مشروع StarRoad: ممر إطلاق كهرومغناطيسي فائق الثقل من الأرض إلى الفضاء

المحتويات

التنقل: البداية | المحتويات | النهاية

1. الوصف والسمات الأساسية والقدرات والفلسفة
1.1. الفلسفة الأساسية للمشروع
1.2. القدرات
2. المزايا والمسوغات التقنية والاقتصادية والجغرافية والاستراتيجية
2.1. التقنية
2.2. الاقتصادية
2.3. الجغرافية
2.4. الاستراتيجية
3. الأساس الصناعي والتقني
3.1. الرفع والتسريع المغناطيسيان (ماغليف)
3.2. تقنيات الموصلات الفائقة والبنية الموزعة
3.3. الطاقة النبضية
3.4. تقنيات الفراغ
3.5. الديناميكا الهوائية فرط الصوتية والحماية الحرارية
3.6. منظومات الطاقة النووية
3.7. إنشاء الأنفاق
3.8. نظام مستقل للطاقة الحرارية الجوفية
3.9. الاحتراق فوق الصوتي
3.10. دورة الوقود المغلقة لبوابة العبور
3.11. استراتيجية التحقق من التقنيات
4. وصف مرحلي مفصل لعناصر StarRoad وتقنياتها
4.1. نفق التسريع وبنيته التحتية
4.2. البوابة الجوية (محطة المرتفعات)
4.3. المركبة المكوكية (AstroLiner)
5. دورة التشغيل من التحضير للإطلاق إلى الصيانة بعد الهبوط
5.1. التحضير والإطلاق
5.2. التسريع داخل النفق
5.3. الخروج عبر البوابة الجوية
5.4. عبور الغلاف الجوي
5.5. دخول الفضاء والعمليات المدارية
5.6. مغادرة المدار والعودة
5.7. الهبوط في المحيط
5.8. السحب والصيانة
6. التنفيذ والجدول والمتطلبات والمراكز الصناعية
6.1. مراحل المشروع
6.2. المراكز الصناعية
6.3. الإطار الزمني العام
7. المشكلات والمهام التي يعالجها المشروع
7.1. الاحترار العالمي المفرط

7.2. المهمة الاقتصادية
7.3. الهدف الاستراتيجي
7.4. محفز تقني
7.5. الاستقلال في الطاقة والتحكم الحراري
7.6. البصمة الكربونية
7.7. الإمكانات الاجتماعية والبيئية للقناة الرئيسية الحرارية المائية
7.8. شبكة الطاقة
7.9. StarRoad شريان اقتصادي
7.10. سلامة البنية التحتية الحرجة
7.11. اختيار الموقع وقابلية التوسع
7.12. التنسيق السياسي والقانوني لمشروع عابر للقارة
7.13. النمو التطوري لتدفق البضائع
8. الأسواق والخدمات اللوجستية المدارية
8.1. مشكلة الطلب على الإطلاقات فائقة الثقل
8.2. السوق الأولية: الطاقة الشمسية الفضائية ومراكز البيانات المدارية
8.3. المبرر المناخي والصناعي للطاقة الشمسية الفضائية
8.4. المواقع المدارية: GEO وEML4/5
8.5. المرحلة الأولى: رحلات AstroLiner-S المباشرة
8.6. مرحلة النضج: مرحلات الموجات الصغرية وبنية الخدمة
8.7. تقسيم النقل حسب بيئة التشغيل
8.8. دور AstroLiner في اللوجستيات الناضجة
8.9. ناقلات وقاطرات بين مدارية
8.10. الهبوط إلى الأرض والكواكب الأخرى
8.11. الوحدات المعيارية
8.12. هرمية البنية المدارية
8.13. أحواض بناء السفن المدارية
8.14. المستوطنات المدارية والقمرية
8.15. المجاز اللوجستي: الفضاء شبكة بحرية
8.16. اقتصاديات تدفق البضائع
8.17. مراحل تطور السوق واللوجستيات
8.18. آفاق التطور: خليفة StarRoad
8.19. إمكانات هندسة الكواكب: النظام الشمسي منظومة موارد واحدة
8.20. الخلاصة الاستراتيجية
9. النموذج الاقتصادي للمشروع
9.1. المنهج والافتراضات الرئيسية
9.2. كلفة الحفر في الظروف الأفريقية
9.3. أسطول آلات حفر أنفاق مصنّع داخلياً
9.4. نظام مستقل للطاقة الحرارية الجوفية
9.5. نظام تخزين الطاقة
9.6. المراكز الصناعية والخدمات اللوجستية
9.7. البحث والتطوير والنماذج الأولية — المرحلة 0
9.8. الملخص النهائي للإنفاق الرأسمالي
9.9. التوزيع حسب المراحل (مليار USD)
9.10. استرداد الاستثمار وتطور كلفة النقل
9.11. المقارنة بالبدائل
9.12. الخلاصة الاقتصادية
10. السلامة وأوضاع التشغيل الطارئة
10.1. فلسفة السلامة: لا يجوز أن يكون أي عطل منفرد كارثياً

10.2. المخاطر الرئيسة ووسائل الحماية منها
10.3. تسلسل بروتوكولات الطوارئ
10.4. التدابير الإنشائية لضمان البقاء
10.5. الآثار الصوتية وآثار موجة الصدمة
11. الأثر الثقافي والنفسي
11.1. المشهد بوصفه ظاهرة
11.2. الصدى النفسي والرمزي
11.3. النتائج الاجتماعية والاقتصادية
12. الخلاصة

1. الوصف والسمات الأساسية والقدرات والفلسفة

StarRoad منظومة نقل رئيسية طويلة المسافة من الأرض إلى الفضاء، مبنية حول مسرّع مفرغ ذي رفع مغناطيسي يزيد طوله على 2,050 كيلومترًا. وهي مصممة لإرسال مركبات مكوكية ذاتية وقابلة لإعادة الاستخدام وفائقة الثقل، بكتلة تصل إلى 15,000 طن، إلى الفضاء من دون حمل وقود دفع تفاعلي للإطلاق على متنها.

1.1. الفلسفة الأساسية للمشروع

تحول في نموذج الإطلاق الفضائي:

- **عبور الغلاف الجوي بالقصور** الذاتي. بدلًا من التغلب على الغلاف الجوي بالدفع والكفاءة الهوائية، تستخدم StarRoad الطاقة الحركية المختزنة في كتلة مركبة سُرّعت في الفراغ إلى سرعة فرط صوتية تقارب 11 كم/ث. ويُعبر الغلاف الجوي كله بالقصور الذاتي خلال 50–60 ثانية.
- **الكتلة بوصفها ميزة.** تتوقف الكتلة الكبيرة — آلاف الأطنان — عن كونها عائقًا، وتصبح حاملة لطاقة حركية هائلة، كما تتيح استخدام مواد فائقة المتانة ومقاومة للحرارة في الهيكل والحماية الحرارية.
- **فصل الوظائف.** تُسند البنية التحتية للطاقة والتسريع والتحكم الدقيق إلى المجمع الأرضي، فتتحول إلى منظومة هندسية ثابتة. وتصبح المركبة وحدة نقل متخصصة محسّنة لحمل الشحنات والمناورة المدارية والعودة.
- **تصنيع قابل للتوسع. لا** تُصمم المنظومة كمنشأة منفردة، بل كأول خط في «سكة حديد» فضائية، مع إمكان إنشاء أنفاق متوازية واحتياطية وإضافية، بما يحقق نموًا متسارعًا في القدرة وانخفاضًا في التكلفة.

1.2. القدرات

- **النقل المباشر إلى ما وراء المدار الثابت** بالنسبة إلى الأرض (GEO). تتيح سرعة ابتدائية تبلغ نحو 11 كم/ث، مضافًا إليها قرابة 0.465 كم/ث من دوران الأرض عند خط الاستواء، للمركبة بلوغ وجهات عالية الطاقة مثل نقطتي لاغرانج L1/L2 في منظومتي الأرض–الشمس أو الأرض–القمر بصورة شبه مباشرة وبأدنى تصحيح. وهذا يلغي السحب وإعادة التزوّد بالوقود في المدار الأرضي المنخفض.
- **قدرة الحمولة.** يمكن نقل آلاف الأطنان في رحلة واحدة. وهذا يجعل بناء محطات طاقة مدارية من فئة الغيغاواط، ومستوطنات فضائية، ومجمعات استخراج الموارد ومعالجتها وتجميعها وتصنيعها، ومنظومات دفاع كوكبي، ومركبات بين كوكبية أمرًا مجديًا اقتصاديًا.
- **التكلفة. عند** الاستخدام الكامل، قد تنخفض التكلفة المحسوبة للنقل إلى المدارات **العالية إلى 1–10 دولارات** للكيلوغرام، أي أقل بعدة مراتب من منظومات الصواريخ القائمة والمستقبلية.

2. المزايا والمسوغات التقنية والاقتصادية والجغرافية والاستراتيجية

2.1. التقنية

لا تقيد معظم مفاهيم الإطلاق المداري البديلة إمكانية بنائها من حيث المبدأ، بل متطلبات تشغيلها: العمل المستمر، والدعم الديناميكي النشط، والموثوقية العالية بصورة غير واقعية، والعواقب الكارثية للأعطال. تحتاج المنشآت الحركية العملاقة النشطة إلى كهرباء بلا انقطاع وتثبيت ديناميكي مستمر كي تبقى عاملة؛ وعند فقدان الطاقة أو التحكم تفقد البنية دعمها وتدخل حالة عطل قد تكون كارثية. كما تفرض أنظمة الأنابيب الخارجية المفرغة الطويلة شروطًا استثنائية للإحكام وعزل المقاطع والاستقرار الحراري. تختلف StarRoad لأن بنيتها الحرجة تحت الأرض، وتسمح بالتشغيل النبضي، وتحصر الحوادث موضعيًا، وتبقى مستقرة سلبيًا. وهذا يجعلها الحد الأدنى القابل للتنفيذ لمنظومة رئيسية تنقل الشحنات إلى ما وراء الأرض. ويزيد من واقعية النهج استخدام تقنيات حقيقية — النقل المفرغ، والديناميكا الهوائية فرط الصوتية، والطاقة النبضية، والموصلات الفائقة — بعد تكييفها مع مقياس StarRoad.

2.2. الاقتصادية

التكاليف الأساسية هي الإنشاءات الرأسمالية والطاقة. ويخفض غياب المراحل المستهلكة والاستهلاك الضئيل لمائع التشغيل أثناء الإطلاق تكاليف التشغيل جذريًا. كما يحفز المشروع التنمية الإقليمية ومنظومات الطاقة الجديدة والتجمعات التقنية المتقدمة.

يتطلب تقييم الجدوى الاقتصادية لـ StarRoad النظر في حجم البنية التحتية العالمية للنقل والطاقة. فعدة ملايين من الأطنان تمثل نسبة ضئيلة من تدفقات الشحن السنوية العالمية، بينما يعد استثمار مئات المليارات من الدولارات أمرًا اعتياديًا للبنية التحتية الكوكبية. لذلك لا تنافس StarRoad منظومات النقل القائمة؛ بل تشغل مجال ممر عالي الطاقة يضيف قدرات جديدة مع أثر محدود نسبيًا في إجمالي تدفقات الشحن العالمية.

2.3. الجغرافية

يقترب المسار من مصب نهر نيانغا في الغابون إلى جبل موهي والهضبة الجنوبية في جمهورية الكونغو الديمقراطية من المثالية:

- **خط الاستواء.** أقصى زيادة في السرعة من دوران الأرض وأدنى تصحيح لميل المدار.
- **خط الرؤية. مسار** مستقيم نسبيًا عبر مناطق قليلة السكان في وسط أفريقيا.
- **ارتفاع البوابة.** يخفض ارتفاع 3,400 متر كثافة الغلاف الجوي عند المخرج بنسبة 30%، فيخفف الأحمال الحرارية والصدمية.
- **الاستقرار الزلزالي.** يظهر صدع شرق أفريقيا نشاطًا ضئيلًا في هذه المنطقة.
- **الخدمات اللوجستية.** يبدأ المسار عند المحيط لتصنيع المركبات واستعادتها، وينتهي على ارتفاع عالٍ.

- **المسار والموقع الأمثلان** هما **الخط البالغ نحو 2,050 كم من مصب نهر نيانغا في الغابون** إلى جبل موهي في جمهورية الكونغو الديمقراطية. **يمنح الإطلاق من ساحل الغابون ميلًا مداريًا** استوائيًا شبه مثالي بنحو 3°، فيوفر وصولًا مباشرًا إلى المدار الثابت ونقاط لاغرانج ويقلل تكلفة الانتقالات بين الكواكب. يقع مجمع **البوابة على جبل** موهي بارتفاع يقارب 3,400 م، وتُحجز الهضبة الجنوبية الواسعة للتوسع. ويتميز الموقع بالارتفاع، والأرض المستوية، والابتعاد أكثر من 20 كم عن التجمعات السكنية، والقرب من بحيرتي تنجانيقا وكيفو.
- **الموقع البديل. يبلغ طول** مسار احتياطي من ميناء كيتومب في **جمهورية الكونغو الديمقراطية** إلى **جبل موهي** نحو 1,850 كم، ويبقى بالكامل داخل دولة واحدة، مما يبسط الخدمات اللوجستية والتنسيق القانوني. لكنه **ينتج ميلًا** مداريًا بنحو 13°، ويتطلب **دلتا-في إضافية قدرها نحو** 200–300 م/ث لإرسال الشحنات إلى المدار الثابت عند 0° أو إلى نقاط لاغرانج. **ويعادل ذلك** فقدان نحو 2–4% من كتلة الحمولة في كل إطلاق. لذا يمثل اختيار المسار الدولي **الأكثر تعقيدًا**، لكنه **استوائي** بميل يقارب 3°، قرارًا استراتيجيًا يهدف إلى أعلى كفاءة اقتصادية طوال عمر الممر وإلى وصول مباشر لكل العقد الحرجة في البنية المدارية.

2.4. الاستراتيجية

إنشاء ممر نقل فضائي يعمل في كل الأحوال الجوية وعلى مدار الساعة. وعلى المدى البعيد تصبح شبكات هذه الخطوط بنية تحتية عالمية، وضمانًا حضاريًا يتيح الإجلاء الجماعي، وأساسًا للتصنيع الفضائي الكامل الذي ينقل الصناعات كثيفة الطاقة والمولدة للحرارة إلى خارج الأرض.

حتى إذا حققت الأنظمة الصاروخية تكاليفها المعلنة شديدة الانخفاض لنقل الحمولات، يظل إطلاق الصاروخ حدثًا منفصلًا محدود القدرة. وبهذا المعنى تظل الأنظمة الصاروخية — بصرف النظر عن سعر الكيلوغرام — لوجستيات حملات بطبيعتها. أما StarRoad فهي ممر بنية تحتية لا يهدف فقط إلى تقليل تكلفة الإطلاق الواحد، بل إلى إنشاء تدفق شحن مستقر ومتواصل.

3. الأساس الصناعي والتقني

لا تحتاج StarRoad إلى اكتشاف قوانين فيزيائية جديدة، بل تمثل ذروة التكامل الهندسي بين تقنيات قائمة وناشئة:

3.1. الرفع والتسريع المغناطيسيان (ماغليف)

تستفيد من خبرات الصين واليابان وألمانيا. وتثبت أرقام التسارع القياسية في تجارب الماغليف الصينية — تسريع طن واحد من 0 إلى 700 كم/س في ثانيتين — الإمكان المبدئي لتسريع الأجسام الضخمة بسرعة.

3.2. تقنيات الموصلات الفائقة والبنية الموزعة

تستخدم StarRoad بنية معكوسة: تُحمل المغناطيسات فائقة التوصيل التي تولد مجال الرفع والتثبيت الرئيسي على متن المركبة، وتبردها أنظمتها العميقة التبريد. ويحتوي النفق على ملفات «سكة» نحاسية أو ألومنيومية بسيطة ورخيصة نسبيًا، تعمل أدلة سلبية ودائرة ثانوية لنقل طاقة التسريع النبضية. وهذا يخفض تكلفة النفق وتعقيده بعدة مراتب، وينقل التعقيد التقني الأساسي إلى المركبة القابلة لإعادة الاستخدام حيث يمكن صيانتها مركزيًا.

3.3. الطاقة النبضية

تُشحن محطات المكثفات الفائقة والبطاريات الموزعة على طول المسار من شبكة منظومة الطاقة الحرارية الجوفية الذاتية، وتوفر نبضات بقدرة غيغاواط إلى مقطع المسرّع المطلوب.

3.4. تقنيات الفراغ

خبرات مصادم الهادرونات الكبير في CERN، وSpinLaunch، وأنابيب Hyperloop المفرغة.

3.5. الديناميكا الهوائية فرط الصوتية والحماية الحرارية

المعارف المكتسبة من المركبات الفضائية ومركبات إعادة الدخول القابلة للمناورة ومشروعات مثل SpaceX Starship. التبريد النشط ومراكم الحرارة بتغير الطور.

3.6. منظومات الطاقة النووية

مفاعلات صغيرة على متن المركبة تتجاوز جيل المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة، أو وحدات اندماج مستقبلية مثل أنظمة Helion Energy، لتزويد المركبة بالطاقة في المدار.

3.7. إنشاء الأنفاق

آلات حديثة لحفر الأنفاق قادرة على التقدم عشرات الكيلومترات سنويًا، مع حفر عدة أنفاق بالتوازي.

3.8. نظام مستقل للطاقة الحرارية الجوفية

يتضمن المشروع إنشاء بنية متكاملة للطاقة والمناخ بقدرة من فئة الغيغاواط، تعتمد تقنية معدلة للأنظمة الجيوحرارية المحسنة (Enhanced Geothermal Systems, EGS). ويُستخدم ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج (sCO_2)، المستخلص مباشرة من الهواء (Direct Air Capture, DAC)، مائعاً عاملاً. تجمع المنظومة ثلاث وظائف حاسمة: 1) الإدارة النشطة للمجال الحراري الجوفي لضمان ثبات نفق التسريع حرارياً؛ 2) توليد كهرباء الحمل الأساسي؛ 3) عزل CO_2 الجوي على المدى الطويل.

3.9. الاحتراق فوق الصوتي

يستخدم الحاجز الغازي الديناميكي للبوابة محركات نفاثة فوق صوتية حلقية تعمل بخليط الهواء والهيدروجين. ويكوّن الاحتراق فوق الصوتي تدفقًا غازيًا مخروطيًا مستقرًا يتجه إلى الخارج على امتداد محور النفق. ويزيح هذا التدفق هواء الغلاف الجوي ويصنع تدرج ضغط يحمي فراغ المسرّع أثناء مرور المركبة.

3.10. دورة الوقود المغلقة لبوابة العبور

يستخدم الحاجز الغازي الديناميكي وقوداً نظيفاً متجدداً. ينتج التحليل الكهربائي الهيدروجين من الماء، وتستخدم المحركات هواء الغلاف الجوي مؤكسداً. وبعد تشغيل الحاجز يكون بخار الماء فائق التسخين ناتج الاحتراق الرئيس. ويلغي ذلك ضرورة نقل كميات كبيرة من الوقود الكيميائي وتخزينها في موقع جبلي ناءٍ، فيرفع الاعتمادية ويخفض كلفة التشغيل.

3.11. استراتيجية التحقق من التقنيات

يتقدم تطوير المشروع في مسارين متوازيين: النمذجة الرياضية والاختبارات كاملة النطاق للتجميعات الحرجة. ويتيح ذلك تأكيد جدوى المفهوم مبكرًا والحصول على بيانات هندسية دقيقة مع خفض المخاطر على المشروع الرئيسي.

4. وصف مرحلي مفصل لعناصر StarRoad وتقنياتها

4.1. نفق التسريع وبنيته التحتية

- **الطول: نحو** 2,050 كم.
- **المقطع** العرضي. إهليلجي (نحو 17.5 × 12.5 م)، ومحسّن لشكل المركبة الهوائي وللرفع المغناطيسي المستقر.
- **عمق النفق: حتى نحو 8** كم، ويمكن أن يزيد إذا سمحت الظروف الجيولوجية والحرارية. لا يمكن تحديد العمق المقبول لنفق التسريع بدقة إلا بعد مسح جيولوجي تفصيلي يشمل حفر آبار على طول المسار، وبناء ملف حراري، وتقييم إجهاد الصخور وتشققاتها وهيدروجيولوجيتها. وكلما انخفضت حرارة

الطبقات العميقة وتدفقها الحراري، في حدود إرشادية تصل إلى نحو 200–250°C، اتسع نطاق الأعماق الممكنة هندسياً وازدادت حرية تحسين هندسة المسار، بما فيها أنصاف أقطار الانحناء والمقاطع الانتقالية. وهذا يتيح خفض ذرى التسارع والقوى الديناميكية داخل النفق مع الحفاظ على السرعات المستهدفة.

- **الإنشاء:** مركّب. المقطع الابتدائي، بطول نحو 330 كم، مستقيم جوفي قليل الميل يهبط باتجاه البوابة لتبسيط التسريع. أما الجزء الرئيسي فهو نفق عميق أو جوفي يضمن الثبات الحراري وعزل الفراغ والسلامة.
- **هندسة المسار:** قوس على شكل S بعد نحو 330 كم.
  - **القوس الهابط: نصف** قطره نحو 6,300 كم، ويقود النفق تدريجياً إلى العمق لتكوين الزاوية المطلوبة.
  - **القوس الصاعد:** نصف قطره 2,500–3,500 كم، ويقود النفق إلى البوابة بزاوية نحو 5–6° فوق الأفق. اختيرت أنصاف الأقطار بحيث لا يتجاوز التسارع المركزي 4g عند السرعة فرط الصوتية.
- **منظومة الفراغ:** مقسمة إلى قطاعات. كل قطاع، بطول نحو 50 كم، مستقل وله مضخات فراغ وحساسات وصمامات طوارئ خاصة به.

4.1.1. منظومة التسريع

يتحقق تسريع المكوك وتثبيته من تفاعل مغناطيساته فائقة التوصيل على متنه مع مشغلات كهرومغناطيسية خطية موزعة، أي ملفات، داخل النفق. وهذه المشغلات ملفات سلبية مقسمة مصنوعة من موصلات عادية، كالنحاس والألمنيوم، ولا تحتاج إلى تبريد عميق.

- **في الجزء الابتدائي من النفق،** 0–330 كم، توضع **المشغلات أساساً تحت** المسار، فتولد المجال اللازم للتعليق وللتسريع الأولي عند 4g، كما تعوض الجاذبية تعويضاً نشطاً.
- **في الجزء الأوسط، 330–2, 000 كم، ولا سيما** قوس **S، تحيط المشغلات بمحيط** النفق لتوفير تسريع دقيق وإبقاء المكوك قسرياً في مركز النفق عند السرعات فرط الصوتية وتثبيت مساره في المنعطفات. وفي أرضية الجزء النهائي ذي التسارع الشعاعي العالي تُستخدم مواد ملفات معززة وذات فائض بنيوي. ينخفض التسارع على امتداد 330–2,000 كم وفق منحنى من 4g في البداية إلى 0g في النهاية، مع بلوغ السرعة النهائية، نحو 11 كم/ث، عند نهاية المسار.
- **في الجزء الأخير، 2,050–2,000** كم، تُخصص آخر 50 كم للتثبيت والمحاذاة قبل الخروج إلى الغلاف الجوي عبر بوابته. ولا يحدث تسريع في هذا الجزء.

تُرسل الطاقة النبضية من محطات منظومة الطاقة الحرارية الجوفية المستقلة إلى قطاعات محددة من الملفات بتزامن **صارم مع موضع المكوك** ، فتُنشئ مجالاً مغناطيسياً مسافراً يتفاعل مع مغناطيسات المكوك ويسرّعه. تقلل هذه البنية تعقيد النفق وتسهل صيانته، وتنقل العناصر عالية التقنية إلى المكوك القابل لإعادة الاستخدام.

4.1.2. نظام مستقل للطاقة الحرارية الجوفية

لضمان الثبات الحراري والاستقلال الطاقي وطول العمر، يرافق كل نفق تسريع مجمع من سبعة أنفاق خدمة صغيرة القطر، يشكل منظومة متكاملة للطاقة الحرارية الجوفية المستقلة:

- **ستة أنفاق رئيسية للتجميع والطاقة، قطر كل منها 2 م.** تقع أسفل أرضية نفق التسريع بـ30 م، وتتباعد محاورها بالتساوي 7 م. تعمل أزواجاً في نمط دوران عكسي لـCO_2 فوق الحرج شديد التبريد عند +5°C. ويكوّن هذا الترتيب تحت كامل مقطع المسرّع بلاطة مبردة متصلة يزيد سمكها على 15 م، فيلغي الجسور الحرارية تماماً.
- **نفق خدمة تقني واحد قطره 3 م ، يقع** على مستوى نفق التسريع وعلى بعد 3 م إلى جانبه، ويتيح التشخيص والإصلاح الدائمين من دون وقف الحركة. صُممت أنفاق المنظومة لتحمل الأثر المجمع للضغط الداخلي العالي حتى 25 MPa، وضغط الصخور والأحمال الديناميكية **. وتحفر الأنفاق السبعة كلها أساطيل روبوتية بالكامل من آلات حفر الأنفاق الصغيرة (** TBM). تفصل المنظومة بنية الطاقة عن النقل مادياً ووظيفياً، فتمنح موثوقية وقابلية صيانة استثنائيتين.

4.1.3. نظام النظام الجيوحراري الذاتي للتبريد

- **دائرة التبريد العميقة.** تحت نفق التسريع تمر أنفاق التجميع والطاقة التابعة للمنظومة الجيوحرارية، ويدور فيها مائع قائم على CO_2 في حالة كثيفة عالية الضغط أو فوق حرجة. يستهدف التدفق البارد قبل دخول المجمعات العميقة نحو +5...+15°C في النمط الاعتيادي منخفض الحرارة. وبعد التقاط الحرارة الجوفية وعبور الجزء العميق قد تسخن CO_2 إلى أكثر من +100°C بحسب العمق وتدفق حرارة الصخور ونمط توليد الطاقة. تزيل الدائرة الحرارة الجوفية وتكوّن منطقة مبردة أسفل النفق الرئيسي، فتسمح ببناء المسار بأمان على عمق نحو 5–8 كم.
- **القناة الحرارية المائية الرئيسية.** تُبنى على امتداد StarRoad بالتوازي مع طريق الخدمة وخطوط الكهرباء والاتصالات، وتربط المحطات في منظومة سطحية موحدة لتصريف الحرارة.

هي قناة مائية بعرض نحو 5–8 م وعمق 2–3 م. تمر في قاعها عدة خطوط أنابيب لولبية مستقلة عالية الضغط تنقل CO_2 بين المحطات المتجاورة، بينما يعمل الماء مخزناً حرارياً وسيطاً وحاملاً للحرارة.

بعد عقد التوربين أو التبادل الحراري أو الضغط، تدخل CO_2 الملفات عند نحو +50...+80°C. وعلى مقطع بين محطتين بطول نحو 50 كم تنقل الحرارة إلى الماء وتبرد إلى نحو +22...+35°C، وفق الموسم ورطوبة الهواء وشدة الأمطار والتبريد الإشعاعي الليلي ونمط تشغيل القناة.

تُحفظ حرارة ماء القناة عادة في حدود +22...+32°C، وقد ترتفع محلياً في المقاطع الساخنة إلى +35...+45°C. وبالقرب من دخول التدفق الساخن قد يسخن الماء لفترة قصيرة إلى +50...+80°C، ما قد يخفض النشاط الحيوي جزئياً، لكنه لا يجعله صالحاً للشرب بلا معالجة.

تغطى القناة من الأعلى بألواح انتقائية خفيفة تعكس الإشعاع الشمسي وتسمح بتصريف الحرارة في نطاق الأشعة تحت الحمراء.

- **تبريد المحطات. تضم** كل محطة أبراج تبريد ومبادلات حرارية ومضخات وضواغط معززة وموسعات توربينية ومبرّدات احتياطية. وفي التشغيل المعتاد تُصرف معظم الحرارة منخفضة الدرجة سلبياً عبر القناة.

تخفض أبراج التبريد ومبادلات المحطة حرارة CO_2 بعد القناة من نحو +22...+35°C إلى +15...+25°C. وعند الحاجة تخفض المبرّدات الاحتياطية الحرارة إلى −5...+5°C قبل إرسالها إلى المجمعات العميقة. ولا تعمل المبرّدات كنمط دائم أساسي، بل كاحتياط لذرى الحمل والطوارئ والمواسم.

- **الضغط المعزز والموسع التوربيني.** تصل CO_2 إلى المحطة التالية مبردة ولكن بضغط مرتفع. ويمكن عندئذ تمريرها في موسع توربيني يستعيد جزءاً من طاقة الضغط ويخفض الحرارة بالتمدد إلى نحو −10...+5°C، وفق الضغط والتدفق والحالة الطورية المطلوبة.

بعد ذلك تُرسل CO_2 إلى أنفاق التجميع بالحرارة والضغط والحالة الطورية المطلوبة. هذه الدورة ليست مصدراً لطاقة مجانية: يضيف الضاغط شغلاً، وتطرح القناة حرارة الضغط، ولا يستعيد الموسع إلا جزءاً من الطاقة المصروفة. أما النتيجة المفيدة فهي تدفق أبرد وحمل أقل على التبريد النشط.

- **التكرار وثنائية الاتجاه.** تُصمم الخطوط اللولبية مزدوجة وثنائية الاتجاه. عند تلف دائرة، يعاد توزيع التدفق عبر الخط الاحتياطي أو محطة مجاورة. ويمكن عكس اتجاه CO_2 بحسب الحمل الحراري وحالة الطوارئ ووضع المقاطع المختلفة.
- **قابلية الصيانة.** تُقسم القناة ببوابات كل كيلومتر تقريباً. عند تضرر مقطع يُعزل ويخفض منسوب الماء بالمضخات إلى الحد التقني الأدنى أو يجفف جزئياً. وبعد تفريغ الضغط تصل فرق الإصلاح أو المعدات الروبوتية إلى الملفات من دون وقف المسار كله. وأثناء الإصلاح يستمر التبريد بالدوائر الاحتياطية وعكس التدفق وزيادة التبادل عبر المحطات المجاورة وتشغيل المبرّدات مؤقتاً.
- **وظيفة مائية محدودة. يمكن للقناة** أن تؤدي وظيفة ثانوية لإدارة المياه. ومع انحدار ثابت من الشرق إلى الغرب يمكنها الحفاظ على جريان بطيء بالجاذبية وغسل المقاطع وتصريف الفائض بصورة مضبوطة.

يمكن استخدام الأمطار الاستوائية الليلية لملء القناة عبر أحواض التجميع والترسيب والمرشحات ومفيضات الماء. ولأن الماء لا يلامس CO_2 مباشرة، يمكن بعد ترشيح محلي استخدامه للري المحدود ومياه الخدمات في المحطات واحتياط مكافحة الحريق والأحزمة الخضراء الواقية.

تبقى هذه وظيفة ثانوية: لا يُسحب من الماء إلا ما لا يخل بالمهمة الأساسية للقناة، وهي تبريد CO_2 والحفاظ على الثبات الحراري للمنظومة الجيوحرارية.

- **الأهمية لـStarRoad.** تشكل المجمعات العميقة والقناة الحرارية المائية والمبرّدات وأبراج التبريد والضواغط المعززة والموسعات التوربينية والمبرّدات الاحتياطية منظومة موزعة واحدة للإدارة الحرارية. تقلل الاعتماد على آلات التبريد المحلية وترفع تحمل الأعطال وتسمح بإعادة توزيع التدفقات الحرارية بين المحطات، وتجعل إنشاء نفق التسريع عميقاً أكثر واقعية.

وتعزز منظومة التبريد السطحية قيمة StarRoad الاقتصادية أيضاً، إذ تنشئ على طول المسار حزاماً خطياً من المحطات وطرق الخدمة وعقد الطاقة والقناة المائية والمواقع الصناعية والأراضي الزراعية المروية.

4.1.4. الأهمية الاستراتيجية لنظام النظام الجيوحراري الذاتي

إلى جانب الطاقة والتثبيت الحراري، تتمثل الوظيفة الأساسية للمنظومة في إتاحة بناء نفق التسريع الرئيسي بأمان واقتصاد على عمق فائق، 5–8 كم أو أكثر. تزيل الإدارة النشطة للمجال الحراري وتصريف التدفق الجيوحراري القيود الحرارية التي كانت ستجعل هذا العمق مستحيلاً. ويتيح ذلك هندسة S مثلى بأنصاف أقطار كبيرة، لازمة للارتفاع السلس وإخراج المكوك بزاوية نحو 5–6° فوق الأفق، مع إبقاء التسارع الزائد للحمولة والطاقم في حدود نحو 4g على طول 2,050 كم. ومن ثم تمثل منظومة الطاقة الحرارية الجوفية المستقلة الأساس التقني للطاقة ولتحسين المسار البالستي الكامل في StarRoad. ويحفر المجمع كله أسطول روبوتي من آلات TBM الصغيرة.

4.1.5. منظومة الأنفاق التقنية الجانبية المتعامدة

لدعم البناء والتهوية والإصلاح والإخلاء، يُنشأ على طول المسار 40 نفق نقل مائلًا بفواصل 50 كم. يميل كل منها بزاوية 30° وله مقطع إهليلجي يقارب 17.5 × 12.5 م. وتحفرها آلات حفر النفق الرئيسي نفسها، وتربط السطح بالممر الرئيسي على أعماق تصل إلى 8 كم.

- **اللوجستيات.** توفر طريق إخلاء مستقلاً للعاملين والطاقم عند التوقف الطارئ Alarm-2. وبخلاف الآبار الرأسية تسمح الأنفاق المائلة باستخدام مركبات ذاتية الحركة لإخلاء عشرات الأشخاص في رحلة واحدة.

- **السلامة.** توفر طريق إخلاء مستقلاً ثانياً للعاملين والطاقم عند التوقف الطارئ Alarm-2.
- **قابلية التوسع.** تمثل الأنفاق المائلة أساساً لربط خطوط StarRoad المتوازية مستقبلاً. ويمكن حفر فروع أفقية منها إلى أنفاق تسريع جديدة، فتحول شبكة الوصول إلى هيكل نقل متنامٍ باستمرار.
- **التكامل مع** المنظومة الجيوحرارية. تحت كل نفق مائل، وعلى عمق إضافي 10–20 م، تُحفر أنفاق تجميع للتجميد المسبق وتثبيت الصخور أثناء البناء، ثم لتوليد الطاقة لاحقاً.
- **مجمع المحطة السطحية.** ينتهي كل نفق مائل بمحطة سطحية متعددة الوظائف. وكل محطة من المحطات الأربعين عقدة مستقلة تضم:
  - **مجمع تهوية وتنقية** غاز للحفاظ على هواء النفق وإزالة الهواء المستعمل.
  - **قاعدة بناء** ذات ساحات لتخزين الوحدات والمواد المحفورة ومواد البناء ونقلها وحفظها مؤقتاً.
  - **مبنى إداري وخدمي** لطواقم النوبات، يضم غرف تحكم واستراحة وورشاً ومخازن.
  - **محطة كهرباء جيوحرارية ووحدات تبريد** مدمجة في الشبكة المشتركة، تستخدم مائع أنفاق التجميع العميقة وتديره.
  - **محطة التقاط CO_2 ومعالجته** (DAC). تلتقط ثاني أكسيد الكربون مباشرة من الهواء وتغلق دورة المنظومة الجيوحرارية: تُسيّل CO_2 المستخلصة وتُنقى وتُرسل حاملاً للحرارة إلى أنفاق التجميع العميقة.
  - **نقطة اتصال بشبكات الكهرباء والاتصالات الخارجية،** تشمل طاقة احتياطية وقناة عريضة النطاق.
  - **طرق وصول،** برية أو سكك فرعية، للربط بشبكة النقل الإقليمية.
  - **نقطة إخلاء** إلى السطح مجهزة بالإسعاف الطبي الطارئ ومهبط مروحيات.
- **مرونة قانونية وبيئية.** تتيح أنفاق الخدمة المائلة وضع المحطات السطحية خارج الأراضي المحمية — المتنزهات الوطنية والمحميات ومناطق تجميع المياه — حتى حين يمر StarRoad على عمق كبير تحتها. وبذلك تزول العقبة القانونية الرئيسة أمام مد المسار تحت مناطق الحماية من دون إنشاء بنية داخل حدود المتنزه. تُبنى كل محطة في أقرب موقع غير محمي وتُوصل ببئر مائل، ما يبسّط الموافقات ويخفف الضغط البيئي ويلغي الأثر المباشر في النظم البيئية المحمية.

4.1.6. منظومة إمداد القدرة وتخزين الطاقة

بُنيت قدرة مسرّع StarRoad كشبكة ثلاثية المستويات توفر:

- تكراراً مضموناً، فلا يوقف تعطل عنصر واحد التشغيل؛
- سرعة تفريغ تكيفية، من ثوان عند البداية إلى ميكروثوان عند النهاية؛
- وأقصر طول ممكن لكابلات القدرة، لتقليل الفقد والمحاثة.

- **مستويات البنية**

المستوى 0: المخازن الأولية، أي المحطات

- 40 محطة، في كل منها مخازن بالجاذبية، وتخزين كهرومائي بالضخ عبر المحطات الصغيرة على القناة، وبطاريات ليثيوم أيون (BESS).
- السعة الإجمالية لكل محطة: نحو 5–9 GWh، ونحو 360 GWh للمسار كله.
- الخرج: تيار مستمر عالي الجهد، حتى 100 kV، عبر كابلات رئيسية في النفق التقني.

المستوى 1: متحكمات القطاعات، قطاعات 50 كم

- يُقسم المسار إلى 41 قطاعاً بطول 50 كم؛ والأخير 50 كم حتى البوابة.
- لكل قطاع متحكم توزيع رئيسي يتلقى الطاقة من محطتين متجاورتين، بتكرار متقاطع.
- يوزع متحكم القطاع الطاقة على كتل طاقة بطول كيلومتر واحد لكل منها، ويزامن عملها.

المستوى 2: كتل طاقة بطول كيلومتر. لكل كتلة متحكم محلي يقوم بما يلي:

- يتلقى الطاقة من متحكم القطاع؛
- ويدير بطاريات ليثيوم أيون العازلة الموضوعة تحت جدران النفق الرئيسي؛
- ويدير مجموعات الملفات القابلة للتبديل والموصولة عبر حذافات ومكثفات فائقة، داخل تجاويف خاصة خلف جدران النفق.

توفر قناتان مستقلتان من متحكم القطاع إلى كل كتلة كيلومترية التكرار.

- **بنية مسارات الكابلات**

- **الكابلات الرئيسية**، المستوى 0→1: توضع في نفق الخدمة التقني بقطر 3 م، الموازي للنفق الرئيسي على بعد 3 م.
- **التوزيع على المسار:** تمتد الكابلات من كل محطة 50 كم في الاتجاهين، أي 100 كم إجمالاً، فتتداخل مع نطاق المحطات المجاورة. وهكذا يغذي كل قطاع محطتان متجاورتان على الأقل، ما يوفر تكراراً بنسبة 100%.
- **الدخول إلى النفق** الرئيسي: كل 1 كم تعبر الكابلات من النفق التقني إلى الرئيسي عبر ممرات محكمة وتوصل بمتحكم الكتلة الكيلومترية.
- **التوزيع داخل** الكتلة: بعد المتحكم تنقسم التغذية إلى مسارين متوازيين:

المسار A: إلى بطاريات ليثيوم أيون عازلة بسعة نحو 0.5–1 GWh لكل كتلة، لتسوية ذرى الثواني.

المسار B: إلى مجموعات الملفات القابلة للتبديل عبر حذافات، أي مخازن قصورية، ومكثفات فائقة موضوعة خلف جدران النفق.

- **تكييف معدل التفريغ على ثلاث** مناطق. يُحسّن منحنى تسارع المركبة بحيث تكون قدرة الذروة لكل مجموعة ملفات أعلى في البداية، حيث لا تلزم النبضات فائقة القصر، ثم تنخفض باتجاه نهاية المسار. وهذا يسمح باستخدام تقنيات تخزين وفصل مختلفة في المناطق الثلاث:

السبب	نوع التخزين/التبديل	طبيعة التفريغ	جزء المسار	المنطقة
يتحرك المكوك ببطء ويستغرق عبور الكيلومتر أكثر من 0.1 ث. يمكن تشغيله من BESS بلا مخازن عازلة.	بطاريات ليثيوم أيون + عواكس IGBT قياسية	ثوانٍ إلى ملّي ثوانٍ	0–200 كم	**المنطقة I، السرعة المنخفضة**
تزداد سرعة المكوك فتحتاج المنظومة تبديلاً أسرع، لكن الحذافات الميكانيكية تظل مقبولة.	بطاريات ليثيوم أيون عازلة + حذافات قصورية + عواكس SiC	ملّي ثوانٍ إلى ميكروثوانٍ	200–1,000 كم	**المنطقة II، السرعة المتوسطة**
ينخفض زمن عبور الكيلومتر إلى 0.09 ث. ولا تستطيع تثبيت النبضة إلا المكثفات الفائقة ذات الاستجابة النانوثانية.	مكثفات فائقة + مفاتيح ثايرستور سريعة (GTO/IGCT)	نبضات ميكروثانية	1,000– 2,000 كم	**المنطقة III، السرعة العالية**

مهم: الطاقة المطلوبة لكل كيلومتر في المنطقة III أقل منها في المنطقة I بسبب انخفاض التسارع، ما يخفف حمل العناصر رغم تشدد متطلبات سرعة التفريغ.

- **التكرار وتحمل الطوارئ**

- **ازدواج المتحكمات:** لكل متحكم قطاعي وكيلومتري احتياط ساخن، أي لوحتان متماثلتان بتغذية مستقلة.
- **التغذية المتقاطعة:** يمكن لكل كتلة كيلومترية أخذ الطاقة من متحكم قطاعها أو من المتحكمات المجاورة عبر كابلات احتياطية في النفق التقني.
- **التكرار المحلي** للملفات: في كل كتلة ثلاثة مجموعات ملفات مستقلة تُبدل بالتناوب. إذا تلفت إحداها تواصل الأخريان التسريع بكفاءة أقل ولكن بلا توقف.
- **الفصل الطارئ:** عند كشف قصر أو سخونة زائدة، يقطع المتحكم الكيلومتري تغذية كتلته ويعزلها ببوابات بينية من دون التأثير في الكتل المجاورة.

- **التنفيذ المادي والاستنتاجات**

الوظيفة	الموضع	العنصر
تخزين طويل الأمد للطاقة، 360 GWh.	على السطح، في المحطات	**المخازن الأولية**
نقل الطاقة من المحطات إلى القطاعات مع التكرار.	النفق التقني، 3 م	**الكابلات الرئيسية**
توزيع الطاقة على 10 كتل كيلومترية والمزامنة.	تجاويف في النفق الرئيسي كل 50 كم	**متحكمات القطاعات**
تسوية ذرى الثواني في المنطقتين I وII.	تحت جدران النفق الرئيسي	**بطاريات ليثيوم أيون عازلة**
مخزن عازل للنبضات الملّي ثانية.	خلف جدران النفق، المنطقة II	**الحذافات**
تثبيت ميكروثاني وتعويض الانخفاضات.	خلف جدران النفق، المنطقة III	**المكثفات الفائقة**
إدارة تبديل الملفات ومراقبة الحالة والتحكم بالمخازن العازلة.	في تجاويف كل 1 كم	**المتحكمات المحلية الكيلومترية**
تكوين مجال مغناطيسي مسافر لتسريع المكوك.	السطح الداخلي للنفق	**ملفات المسرّع**

- **مزايا بنية إمداد القدرة**

- **توزيع سلس للحمل. لا تُطلب** ذروة القدرة على طول النفق كله في وقت واحد: النبضات بطيئة في البداية، وقصيرة ولكن أقل قدرة في النهاية.

- تكرار على كل المستويات. لا يوقف تعطل محطة أو متحكم أو حتى قطاع كامل بطول 50 كم المنظومة؛ إذ تعوض المحطات والقطاعات المجاورة نقص الطاقة.
- **مرونة التوسع. لا** تتطلب إضافة خطوط StarRoad متوازية جديدة إعادة بناء منظومة الطاقة، بل يكفي مد كابلات رئيسية إضافية في النفق التقني القائم.
- **خفض الكلفة. تُستخدم** المكثفات الفائقة والحذافات المكلفة حيث تلزم فعلاً فقط، أي في المقاطع النهائية، بينما تستخدم في البداية بطاريات ليثيوم أيون الأرخص.

4.2. البوابة الجوية (محطة المرتفعات)

وبذلك تحل مشكلة «الميل الأخير».

4.2.1. الموقع والبنية

يقع مجمع البوابة على هضبة قمة جبل موهي، على ارتفاع نحو 3,400 م في جمهورية الكونغو الديمقراطية. وحُجزت للتوسع المستقبلي هضبة جنوبية واسعة تبعد 16 كم إلى الجنوب وتتسع لعشرات البوابات المتوازية. المجمع منشأة ضخمة تضم حاجزاً ميكانيكياً رئيسياً وأنظمة لتكوين حاجز غازي ديناميكي. وهو عملياً محرك نفاث أرضي ثابت ذو ثلاث فوهات حلقية، موجه بزاوية نحو السماء، لكن غايته ليست تسريع جسم بل إزاحة الهواء وتكوين منطقة عازلة عند دخول المكوك الغلاف الجوي.

4.2.2. الحاجز الغازي الديناميكي

العنصر التشغيلي الرئيسي. قبل وصول المكوك ببضع ثوان يبدأ تكوين تدفق غازي مخروطي فوق صوتي يتجه إلى الخارج على محور النفق.

- **المصدر والبنية.** يتكون الحاجز الغازي الديناميكي من ثلاثة محركات نفاثة حلقية مستقلة ومتراكزة، أو محركات نفاثة تضاغطية فرط صوتية مماثلة بتصميم ثلاثي الأحزمة. تُركب حول فوهة البوابة وتعمل بمزيج وقود من الهواء والهيدروجين، ويُنتج الهيدروجين في الموقع بالتحليل الكهربائي. يوفر التكرار الثلاثي تحملاً للأعطال: يكفي تشغيل أي حزامين لتكوين حاجز فعال، فتظل المنظومة عاملة عند تعطل واحد من الثلاثة. لكل حزام منظومة مستقلة للوقود والتحكم والإشعال. وتحيط الأحزمة بالجزء الخارجي للبوابة في درجات متراجعة من الأصغر إلى الأكبر، بينما يقع الحاجز الميكانيكي داخل البوابة خلف سلسلة الأحزمة. وبذلك يمكن تشغيلها من دون فتح الحاجز الميكانيكي مسبقاً.
- **الوظائف الأساسية** .

1) توليد ضغط متجه إلى الخارج لحماية فراغ النفق أثناء مرور المكوك؛

2) إزاحة هواء الغلاف الجوي وتسخينه مسبقاً في منطقة الخروج أمام البوابة، لتكوين تدرج عند الحد بين فراغ النفق والجو وانتقال تدريجي بين الوسطين.

الحاجز الغازي الديناميكي ليس درعاً انسيابياً للمكوك ولا يعزله عن الغلاف الجوي. وظيفته إطالة زمن الانتقال بين الوسطين، بتحويل حمل الصدمة شبه اللحظي، في نطاق الميكروثانية، عند ملامسة هواء بارد ساكن إلى حمل موزع في نطاق الملّي ثانية عند ملامسة تدفق ساخن يسير في الاتجاه نفسه. لا يخفض ذلك مجموع القوى الانسيابية، لكنه يقلل بشدة حدة الصدمة ومركبتها عالية التردد، فيحد من خطر التلف الموضعي والصدمة الحرارية للهيكل.

- **شكل التدفق:** مخروط إهليلجي المقطع يطابق مقطع النفق والمكوك. يمتد من عشرات إلى مئات الأمتار ويخرج من ثلاثة صفوف من الفوهات الحلقية لأحزمة بوابة الغلاف الجوي.

لا يتطلب الحاجز الغازي الديناميكي لبوابة الغلاف الجوي مخروطاً مثالياً هندسياً أو ثابتاً أو متناظراً تماماً حول المحور. فنمط تشغيله ديناميكي بطبيعته ويقبل تقلبات زمنية ومكانية في الشكل والكثافة والسرعة.

الشرط الصارم والحاسم الوحيد لعمل البوابة هو الحفاظ، طوال خروج المكوك، على تدرج موجب ومتجه إلى الخارج للضغط والزخم يمنع هواء الجو تماماً من دخول النفق، مع إعداد غازي ديناميكي وحراري مسبق للغلاف الجوي في منطقة الخروج. وهذا يرفع موثوقية المنظومة وقابليتها للتنفيذ بدرجة كبيرة.

لذلك يُعامل شكل التدفق كمعامل تكيفي لا كقيمة مستهدفة، ويُحسّن في الزمن الحقيقي وفق خصائص كلية، هي الضغط ومعدل التدفق الكتلي والزخم، لا وفق هندسة جامدة.

- **قابلية التوسع والاختبار.** بخلاف المسرّع الممتد آلاف الكيلومترات، تتسم البوابة ببنية معيارية سهلة التوسع. ويمكن اختبار تقنياتها الأساسية، ومنها تكوين مخروط غازي ديناميكي فوق صوتي مستقر والتزامن وتشغيل الأحزمة النفاثة، اختباراً كاملاً على منصات واقعية عاملة بمقياس 1:5 أو 1:10. وهذا يزيل المخاطر التقنية الرئيسية قبل بدء بناء المسار الرئيسي بالحجم الكامل.

4.2.3. منظومة السلامة

يفرض استخدام الهيدروجين متطلبات مشددة للسلامة من الحريق والانفجار. لذلك تُصمم البنية التحتية للبوابة بمنظومات مزدوجة لكشف تسرب الهيدروجين، وتطهير خامل للخطوط بالنيتروجين، وتجهيزات مقاومة للانفجار، وفصل مادي بين وحدات التحليل الكهربائي والخزانات وأحزمة المحركات، وقنوات تهوية موجهة لتصريف أي انبعاث محتمل بأمان إلى الجو بعيداً عن العاملين والبنية التحتية الحرجة.

4.3. المركبة المكوكية (AstroLiner)

4.3.1. الأبعاد وكتلة الإطلاق

الطول نحو 150 م والمقطع الإهليلجي نحو 10 × 15 م. الشكل إسفين فرط صوتي محسّن لتقليل المقاومة والحمل الحراري أثناء اختراق الغلاف الجوي.

- **كتلة الإطلاق المثلى: نحو** 15,000 طن.

كتلة المكوك البالغة 15,000 طن هي نتيجة البحث عن أفضل توازن هندسي واقتصادي في «الوسط الذهبي» بين القيود الفيزيائية وإمكانات التنفيذ.

المعيار	الحد الأدنى (< 10,000–8,000 طن)	القيمة المثلى (15,000 طن)	الحد الأعلى (> 25,000–20,000 طن)
الديناميكا الهوائية والتسارع الزائد	يسيطر الغلاف الجوي. تولد قوة السحب $Fd = \rho.A \cdot v^2$ تسارعاً زائداً كبيراً $a = Fd/m$، فتستلزم تثبيتاً نشطاً معقداً وتنتج ذرى حرارية.	**يسيطر القصور** الذاتي. تولد مقاومة الجو في البداية تسارعاً زائداً قصير المدة، حتى 5 ثوان، يبلغ نحو 3–6g، ما يسمح بأنظمة أبسط لامتصاص الصدمات والحماية الحرارية.	ينخفض التسارع الزائد قليلاً فقط، بينما تلغي عوامل أخرى الفوائد.
النظام الحراري	سعة حرارية منخفضة. تؤدي الكتلة الصغيرة m إلى ارتفاع سريع في الحرارة $\Delta T = Q \cdot t / (m \cdot c)$، ما يستلزم أنظمة تبريد نشطة قصوى.	**قصور حراري مرتفع.** يمتص الهيكل الضخم حرارة الذروة الناتجة من الاختراق القصير للغلاف الجوي ويبددها، فيتيح الجمع بين الحماية الحرارية السلبية والنشطة.	تزداد السعة الحرارية، لكن إزالة الحرارة من الهيكل الضخم تصبح مشكلة مستقلة.
طاقة الإطلاق	الطاقة المطلوبة $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ مقبولة، لكنها لا تعوض العيوب.	**توازن معقول. تبلغ** طاقة التسريع إلى 11 كم/ث نحو 9×10^{14} جول، أي نحو 252 GWh، وهي ضمن قدرة منظومة الطاقة الحرارية الجوفية المستقلة الموزعة ووحدات التخزين.	تزداد كلفة الطاقة خطياً، لكنها تتطلب زيادة غير متناسبة في القدرة وسعة التخزين، وهو أمر غير اقتصادي.
البنية واللوجستيات	قابل للتنفيذ، لكنه لا يقدم الميزة الأساسية لـ«الكبش القصوري».	**متوافق مع التقنيات القائمة.** تتناسب الأبعاد والكتلة مع أحواض بناء السفن الحديثة وأساليب اللحام والنقل.	يفقد الهيكل صلابته وتظهر مشكلات الاهتزازات الذاتية والتجميع والنقل إلى موقع الإطلاق، وترتفع الكلفة بأكثر من المعدل الخطي.
فلسفة StarRoad	يبقى ضمن نموذج «المركبة الخفيفة» الهشة أمام الغلاف الجوي.	**يحقق نموذج «الكبش القصوري»:** الغلاف الجوي ليس حاجزاً، بل اضطراب قصير يُتجاوز بالكتلة والمتانة.	يتحول إلى مهمة تفوق قدرة الصناعة وتلغي وفورات الحجم.

- **فيزيائياً،** يقع فوق العتبة، نحو 10,000 طن، التي يبدأ بعدها القصور الذاتي بالتغلب على التأثير الانسيابي.
- **طاقياً، لا** يؤدي إلى نمو أُسّي في متطلبات البنية التحتية.
- **تقنياً، يبقى** ضمن الممارسات الصناعية القابلة للتوسع، كبناء السفن والهندسة الثقيلة.
- **اقتصادياً،** يوازن بين خفض كلفة الإطلاق بفضل الحجم وبين الحد من الإنفاق الرأسمالي.

ومن ثم فإن هذا المعامل **قيمة مثلى محسوبة تجعل مفهوم StarRoad ممكناً فيزيائياً ومبرراً** اقتصادياً.

4.3.2. التوزيع الداخلي والمنظومات

تُصمم البنية الداخلية كلها كهيكل طولي متعدد المستويات، مع فصل الوظائف وفق ارتفاع البدن.

- **يُخصص الجزء السفلي** والخلفي من البدن كاملاً لمنظومات الطاقة والقوة: المفاعل، والمبادلات الحرارية، ودوائر التبريد النشط، ومحولات القدرة، ومخازن الطاقة، وخطوط سائل التبريد، وعناصر الدفع البحري. يخفض هذا التوزيع مركز كتلة المكوك، فيزيد ثباته أثناء الطيران فرط الصوتي والتحليق والانسيابي والهبوط المائي، كما يبسّط الحماية الحرارية والإشعاعية للأقسام العليا.

- **تُدمج منظومة التعليق والتثبيت فائقة** التوصيل على جانبي المكوك وجزئياً في قاعه. تثبت الوحدات خلف الغلاف الخارجي وطبقة الحماية الحرارية مباشرة لتقليل الفجوة بين المجال المغناطيسي وملفات النفق السلبية. وتوضع المغناطيسات:
  - على الجانبين بطول البدن كله، بما في ذلك المنطقتان العليا والوسطى حتى خط الأبواب العلوية المنزلقة؛
  - في الجزء الأوسط والخلفي من القاع؛
  - مع استثناء مناطق خروج الأجنحة الرئيسية والتجاويف الميكانيكية.

  يوفر هذا التوزيع مجالاً مغناطيسياً متجانساً وثباتاً عالياً عند السرعات فرط الصوتية وتحمل الأعطال عند الضرر الموضعي.
- **يُخصص وسط البدن** لتجاويف الأجنحة القابلة للطي ولإطارها الحامل. تنطوي الأجنحة الرئيسية داخل البدن وتُعزل عن أقسام الطاقة والحمولة. ويضم القسم الأمامي من منطقة الأنف الوسطى أجنحة تحكم صغيرة قابلة للامتداد لتصحيح المسار والتثبيت في الحالات الانتقالية.
- **يُخصص أعلى** البدن لوحدة حمولة معيارية قابلة للاستبدال. تُوحّد أبعاد الوحدة ونقاط تثبيتها وكتلتها والموقع المقبول لمركز ثقلها، ويمكن تجهيزها للشحن أو الوقود أو الركاب أو مزيج منها. تُركب وتُزال في الحوض قبل الإطلاق، ويمكن التعامل معها في المدار بعد فتح الأبواب العليا. ويحتوي حيز الشحن على رافعة هيدروليكية أو كهروميكانيكية وأدلة مدمجة لإخراج الوحدات آلياً في الجاذبية الصغرى من دون تدخل الطاقم.
- **الأبواب العليا** المنزلقة ليست أجزاء حاملة من الهيكل، بل تعمل كغطاء انسيابي ومنفذ مداري. وتُدمج فيها ألواح مشعاع حراري قابلة للطي. بعد فتح الأبواب وتثبيتها بالكامل تنتشر الألواح آلياً ثم يمر فيها سائل التبريد لتصريف الحرارة الزائدة إلى الفراغ.
- **للجزء الأمامي من** المكوك توزيع وظيفي متعدد المستويات:
  - المنطقة العليا من الأنف: الجسر وأنظمة التحكم والملاحة والاتصال؛
  - المنطقة الوسطى: آليات الأجنحة الصغيرة القابلة للامتداد وأسطح التحكم؛
  - المنطقة السفلى: خزانات الوقود وسائل التبريد العميقي، لتقليل المقاومة الهيدروليكية وتسريع وصول المبرد إلى منظومات تبريد الأنف النشطة أثناء اختراق الجو.

يحقق هذا التوزيع دوائر حرارية وهيدروليكية قصيرة، ويخفض القصور الحراري للأنف، ويرفع موثوقية الحماية الحرارية في أشد مراحل الرحلة حملاً. وبوجه عام، تتكون المركبة من بنية صارمة التنظيم وقابلة للتوسع ومعيارية، محسنة للإطلاق فرط الصوتي والعمليات المدارية والإبحار الذاتي وتكرار الاستخدام من دون تفكيك عميق للبدن.

4.3.3. الحماية الحرارية للبدن

يُجهز الأنف وقاع المكوك بمنظومة حماية حرارية متعددة الطبقات من المواد المركبة والمعادن، مصممة للأحمال الحرارية والديناميكية القصوى في الطيران فرط الصوتي والهبوط المائي اللاحق. تجمع المنظومة عناصر سلبية ونشطة وتشمل:

- طبقة خارجية مقاومة للحرارة تتحمل لوقت قصير درجات تبلغ آلاف الدرجات وتسخيناً إشعاعياً كثيفاً؛
- طبقة معدنية حاملة تستقبل الأحمال الميكانيكية والاهتزازية؛
- دوائر تبريد نشط تزيل الحرارة من أشد المناطق حملاً، وخصوصاً الأنف والحافة الأمامية للقاع؛
- عناصر استئصالية قابلة للاستبدال في المواضع الحرجة، مصممة لتتآكل بصورة مضبوطة من دون الإضرار بالهيكل الأساسي.

تراعي منظومة الحماية الحرارية الصدمة الناتجة من ملامسة البدن الساخن للماء عند الهبوط في المحيط، بما فيها فروق الحرارة الحادة والإجهادات الحرارية الدورية. وتسمح البنية بتقسيم أكثر العناصر تعرضاً للأحمال واستبدالها معيارياً أثناء الصيانة، ما يزيد سهولة الإصلاح وعمر التشغيل المتكرر.

4.3.4. الأجنحة

للمكوك زوجان من الأجنحة القابلة للامتداد للتثبيت والتحليق الانسيابي والهبوط. وتُفتح بعد بلوغ طبقات الجو المخلخلة.

- **يصحح زوج الأجنحة** الأمامي المسار ويثبت الميلان الطولي والدوران ويخمّد الاضطرابات الديناميكية. ويُفتح للتحليق الانسيابي بعد بلوغ الطبقات المخلخلة.

  معاملات كل جناح أمامي:

  - الطول من الجذر: نحو 35 م؛
  - العرض عند الجذر/الطرف: نحو 7/14 م؛
  - المساحة: نحو 360–400 $م^2$.
- **زوج الأجنحة** الخلفي هو السطح الانسيابي الرئيسي للمكوك.

  معاملات كل جناح خلفي:

- الطول من الجذر: نحو 100 م؛
- العرض عند الجذر/الطرف: نحو 7/14 م؛
- المساحة: نحو 1,100–1,000 م^2.

تبلغ مساحة الأجنحة الإجمالية نحو 2,900–2,800 م^2. ويسهم شكل البدن الرافع في قوة الرفع، فيزيد المساحة الانسيابية الفعالة بنحو 20–30%.

في السرعات دون الصوتية يحقق التكوين نسبة رفع إلى سحب L/D ≈ 9–13، ما يتيح تحليقاً انسيابياً مستقراً واختياراً مضبوطاً لموقع الهبوط. وتُقدّر سرعات التحليق والهبوط المائي المعتادة بـ90–120 م/ث، أي نحو 320–430 كم/س. عند هذه السرعات لا تتحدد سلامة الهبوط بالسرعة الأفقية المطلقة، بل بسرعة التماس الرأسية وزاوية الهجوم ومسار الانحدار.

4.3.5. أنظمة المظلات

لتقليل صدمة الهبوط المائي وتوسيع نافذة الهبوط المقبولة، يحمل المكوك منظومة مظلات ومظلات جناحية قابلة لإعادة الاستخدام، تعمل كمسار متاح عادة للهبوط الناعم.

- **البنية والموضع. تضم** المنظومة موقعين للمظلات الجناحية:
  - أحدهما **في أعلى المؤخرة** ؛
  - والآخر **في أعلى المقدمة**، خلف منطقة الأنف مباشرة.

  يستخدم كل موقع ترتيب N+1 ، أي مظلة جناحية رئيسية وأخرى احتياطية، بحزم وخطوط سحب مستقلة. ولا تُثبت المظلة في نقطة واحدة، بل **عبر خط تثبيت عرضي** إلى الإطارات الحاملة، ما يخفض ذرى الحمل الموضعية ويحسن الثبات في الميل والدوران. وتفصل القبتان على المحور الطولي لمنع التداخل والتشابك.
- **المساحات ونمط العمل.** لا تحمل المظلات الجناحية وزن المركبة كله، بل تخمد السرعة الرأسية في المرحلة النهائية وتكوّن مرحلة تماس سلس. القيم التقريبية:
  - مساحة المظلة الجناحية الرئيسية الواحدة: نحو **6,000–4,500 م^2** ؛
  - المساحة النشطة الإجمالية عند تشغيل المظلتين: نحو 9 **,000–12,000 م^2** .
  - السرعة الرأسية المستهدفة عند التلامس هي —$V_z \approx 1\ m/s$.
- **معيار التفعيل.** لا تستخدم منظومة المظلات إلا عند **الحاجة. تراعي خوارزمية** الهبوط التسارع **الزائد الكلي، أي** المجموع المتجهي للمركبات الانسيابية والقصورية والهيدروديناميكية:
  - إذا لم يتجاوز التسارع الكلي المتوقع عند **التماس 4g**، يهبط المكوك على **أجنحته من دون المظلات** الجناحية؛
  - وإذا **وُجد** خطر **تجاوز** 4g، تُفعّل المنظومة وتخفض المركبة الرأسية للسرعة إلى القيمة المستهدفة، فتحول الهبوط إلى تحليق انسيابي ناعم.
- **إعادة الاستخدام.** صُممت المظلات وخطوطها ووصلاتها للاستخدام المتكرر مع صيانة دورية تشمل الفحص والتجفيف واستبدال الأجزاء السريعة التآكل، من دون تفكيك الإطار الحامل للبدن.

4.3.6. منظومة القدرة والدفع المستقلة

يحمل المكوك منظومة طاقة ودفع مستقلة تماماً تغطي دورة المهمة كلها، من المناورات المدارية إلى الإبحار الذاتي لأشهر.

- **مصدر الطاقة الأساسي: مفاعل نووي على متن المكوك.**
  - **النوع:** مفاعل سريع مدمج بالأملاح المنصهرة أو مفاعل غازي عالي الحرارة من الجيل التالي. وفي المستقبل يمكن استخدام وحدة اندماج مدمجة، مثلاً بتصميم ضغط المجال على غرار Helion Energy.
  - **القدرة:** كهربائية 10–20 MW؛ حرارية 50–100 MW.
  - **المهمة:** تغذية جميع أنظمة المكوك، والعناصر فائقة التوصيل في التعليق المغناطيسي ، **والمحركات الكهرومغناطيسية** البلازمية، والتبريد النشط ، **ودوافع الإبحار الذاتي.** صُمم المفاعل للعمل بلا إعادة تزويد بالوقود طوال عمر المكوك، 5–10 سنوات.
- **منظومة التعليق والتثبيت فائقة التوصيل على** المتن. تُدمج على طول البدن وحدات تبريد عميق فيها مغناطيسات مبنية على موصلات فائقة عالية الحرارة، وتُبرّد بالنيتروجين أو الهيدروجين السائل من أنظمة المكوك. تولد هذه المغناطيسات المجال الأساسي القوي للتعليق والتثبيت النشط. وحتى عند انقطاع طاقة النفق الخارجية كلياً، يبقى المكوك معلقاً بفعل الاقتران الحثي مع ملفات «السكة» السلبية، أي تأثير «المرآة المغناطيسية».

تتبع منظومة التحكم بالتثبيت بنية هرمية:

1) **المسار السلبي،** في نطاق الميكروثانية: يولد الاقتران الحثي بين الموصلات الفائقة وملفات النفق قوة إرجاع تلقائية عند أي انزياح، من دون إلكترونيات.
2) **المسار العتادي،** من الميكروثانية إلى الملّي ثانية: تكشف دوائر متخصصة، FPGA وASIC، الاختلال وتبدل القطاعات وفق خوارزميات ثابتة.
3) **المسار البرمجي،** من الملّي ثانية إلى عشرات الملّي ثانية: يعيد حاسوب المكوك، بدعم ذكاء اصطناعي محدود، توزيع التيارات بين القطاعات فائقة التوصيل لتعويض الانجراف البطيء والاختلال الموضعي، من دون حاجة إلى استجابة نانوثانية.

تؤمن هذه البنية استجابة في نطاق الملّي ثانية للاضطرابات، وهي أسرع بمراتب من متطلبات ثبات مكوك كتلته 15,000 طن عند سرعات فرط صوتية.

- **المحركات الرئيسية: محركات كهرومغناطيسية بلازمية عالية الدفع.**
  - **المبدأ:** محركات مغناطيسية بلازمية ديناميكية (MPD) أو صاروخ مغناطيسي بلازمي متغير النبضة النوعية (VASIMR)، تغذيها قدرة المفاعل.
  - **الدفع:** حتى 50–100 kN، أي 5–10 أطنان قوة، في النمط النبضي؛ وهو كاف لتصحيح المدار ومغادرته والانتقال بين المدارات.
  - **المادة الدافعة:** مخزون من الزينون أو الأرجون أو الهيدروجين السائل، ويستخدم الهيدروجين أيضاً في التبريد.
  - **الاستقلال:** يتحكم ذكاء اصطناعي على المتن بالمحركات ويحسب وينفذ ذاتياً مناورات الالتحام بالمحطات المدارية وتفريغ الحمولة والعودة.
- **منظومة الإدارة الحرارية :**
  - **مشعات قابلة للامتداد.** ألواح ذات دائرة سائلة تنتشر في الفضاء لتصريف حرارة المفاعل والمعدات الزائدة إلى الفراغ.
  - **مخازن حرارية متغيرة الطور. وهي** عناصر حاسمة في الأنف والعقد الحرجة، تمتص ذرى الحرارة، بمقادير ميغاجولية، عند اختراق الجو في الإطلاق والدخول، فتحمي الهيكل من السخونة المفرطة. وفي الفضاء أو المحيط تُصرف الحرارة ببطء عبر المشعات أو إلى الوسط المحيط.
  - **التبريد النشط. دائرة مغلقة** بالهيليوم أو الهيدروجين السائل للتبريد الطارئ للدرع الحراري والعناصر الحرجة أثناء الطيران.
- **التكرار والسلامة: أنظمة** مزدوجة للتحكم بالمفاعل، ودوائر تبريد مستقلة، ووسائل طوارئ لتبديد الحرارة. يضمن التصميم السلامة في كل السيناريوهات، بما فيها السقوط في المحيط.

4.3.7. أنظمة الهبوط والإبحار المستقلة

بعد الهبوط المائي في المنطقة المحددة من الأطلسي يتحول المكوك إلى سفينة بحرية مستقلة تماماً. ويستخدم لذلك:

- **مجموعة الدفع.** وحدتا دفع سمتية قابلتان للامتداد أو دافعا نفث مائي يقدمان قدرة عالية على المناورة عند السرعات المنخفضة.
- **طاقة الإبحار. يغذي** المفاعل النووي أو الاندماجي القياسي ، **في أدنى نمط تشغيل، الدوافع** وأنظمة المكوك بالكهرباء. ويكفي وقود القلب لأشهر من الإبحار المستقل.
- **الملاحة والاتصال.** ملاحة ساتلية GPS/GLONASS وقصورية، ورادار وليدار لإدراك الوضع السطحي، واتصال موثوق عبر أقمار ثابتة جغرافياً.
- **منظومة الكبح النهائي.** لتبديد السرعة المتبقية، 100–150 كم/س، قبيل ملامسة الماء، تُستخدم منظومة **مركبة: مظلة كبح** صغيرة للتثبيت والكبح الأولي، ونبضة **قصيرة من محركات البلازما** الرئيسية لضبط السرعة الرأسية بدقة . **تُفصل المظلة بعد الهبوط.**

يتيح هذا التكوين للمكوك أن يبحر **بعد الهبوط ذاتياً إلى مينائه** أو إلى موعد مع قاطرة، من دون مساعدة فورية. **ويمكنه البقاء مستقلاً في** بحر عاصف وقطع مسافات طويلة والوصول إلى الحوض المحدد للصيانة، فيتحول من مركبة فضائية إلى **سفينة بحرية** روبوتية.

4.3.8. AstroLiner-S: النسخة الابتدائية المبسطة

في المراحل الأولى من StarRoad، وكذلك كتكوين أساسي أبسط تقنياً وأكثر تحفظاً في التشغيل، يُستخدم المكوك الابتدائي AstroLiner-S، أي Simplified / Start.

هذه نسخة كاملة الوظائف من AstroLiner، لكنها مبسطة في الطاقة والأنظمة، ومخصصة للتشغيل الأولي للمسار وللإطلاقات المبكرة للشحن والطاقم ولخفض المخاطر التقنية والتشغيلية والتنظيمية تدريجياً.

- **الفكرة الأساسية لـS- AstroLiner**. يحقق نموذج StarRoad الأساسي، أي اختراق الجو بالقصور **الذاتي، من دون مصدر نووي أو اندماجي على المتن،** مع الاحتفاظ الكامل بأبعاد النسخة الرئيسية وكتلة إطلاقها .

تُنقل العمليات شديدة الطلب على الطاقة، أي التسريع والتعليق والتثبيت في النفق، كلها إلى البنية التحتية الأرضية.

مكوك AstroLiner-S:

- مركبة نقل مستقلة؛
- قابل لإعادة الاستخدام بالكامل؛
- قادر على بلوغ المدار ومغادرته والعودة ذاتياً؛
- لكنه يستخدم الدفع الكيميائي حصراً خارج النفق؛
- ولا يحمل مصادر عالية القدرة للإشعاع المؤين.

- **الطاقة والأنظمة فائقة التوصيل.** يستبعد تكوين AstroLiner-S تماماً:
  - محطات الطاقة النووية والاندماجية؛
  - مخاطرها الإشعاعية والحرارية ومخاطر الحوادث؛
  - سيناريوهات التلوث غير القابل للعكس للنفق ومقاطع البوابة.

  أما عناصر التعليق والتثبيت والتفاعل مع المسار فائقة التوصيل:
  - فتُشحن بالتيار قبل الإطلاق؛
  - وتُنقل إلى نمط التيار المستديم؛
  - وتُعزل عن بعضها وتتحكم بها منظومة المكوك.

  تغذي البطاريات ومخازن القصور، أي الحذافات، إلكترونيات المكوك وأنظمة التحكم والحماية، بسعة تغطي دورة التسريع في النفق كاملة مع هامش زمني.

  يقتصر التحكم النشط في الدوائر فائقة التوصيل أثناء التسريع على تيارات تصحيح صغيرة وحالات الطوارئ، فلا يحتاج المكوك إلى مصدر طاقة مستمر عالي القدرة.

  وفي المدار تعمل الألواح الشمسية القابلة للطي مصدراً نشطاً للطاقة.

- **الدفع خارج النفق**

  تنفذ جميع عمليات AstroLiner-S المدارية بالدفع الكيميائي.

  يُجهز المكوك بـ:
  - محركات كيميائية رئيسية متوسطة الدفع من فئة LOX/LH_2 أو LOX/LCH_4؛
  - وأنظمة مزدوجة للتوجيه والتحكم في الطوارئ (RCS).

  توفر منظومة الدفع:
  - استكمال الصعود إلى المدار المستهدف بعد الخروج من الغلاف الجوي؛
  - وتصحيح المعاملات المدارية؛
  - ومغادرة المدار؛
  - والدخول المنضبط إلى الغلاف الجوي والعودة.

  يعود استبعاد المحركات الكهربائية والمغناطيسية البلازمية من هذه النسخة إلى غياب مصدر كهرباء عالي القدرة على متنها، ولا يمثل قيداً على بنية المنظومة ككل.

- **العودة وإعادة الاستخدام**

  يستطيع AstroLiner-S:
  - مغادرة المدار ذاتياً؛
  - والدخول المنضبط قليل الانحدار إلى الغلاف الجوي؛
  - والتحليق الانسيابي؛
  - والهبوط في المحيط باستخدام الأجنحة ومنظومة المظلات الجناحية.

  ويبسط غياب المفاعل بدرجة كبيرة:
  - التشغيل البحري؛
  - والصيانة الدورية؛
  - واستعادة المركبة بعد هبوط غير اعتيادي.

- **دور AstroLiner -S في تطوير StarRoad**

  يُنظر إلى AstroLiner-S بوصفه:

  - أول نسخة إنتاجية من مكوك StarRoad؛
  - ومنصة لتجميع إحصاءات الإطلاق والأعطال؛
  - ووسيلة لإدخال المنظومة في الخدمة مبكراً؛
  - وناقلاً أساسياً للبنية المدارية الأولية.

  ومع تطور المشروع وظهور مصادر طاقة مدمجة عالية القدرة وتراكم الخبرة التشغيلية، يمكن استكمال AstroLiner-S تدريجياً أو استبداله بالنسخة الكاملة من AstroLiner ذات محطات الطاقة العالية على المتن والمحركات الكهرومغناطيسية البلازمية.

  وهكذا لا يمثل AstroLiner-S حلاً وسطاً، بل مستوى بداية منطقياً يتيح تشغيل StarRoad أبكر وبأمان أكبر ومخاطر منظومية أقل، من دون تغيير البنية الأساسية للمسار.

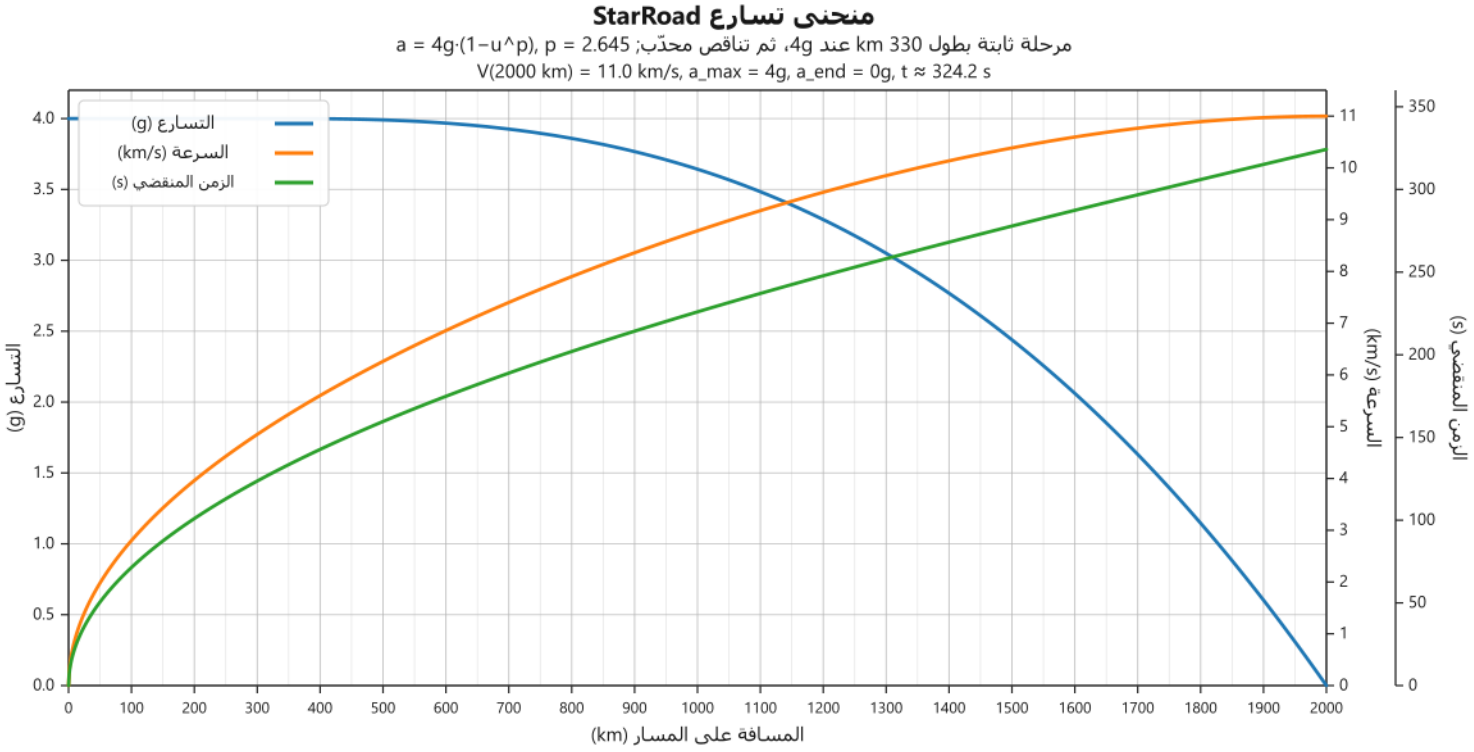
5. دورة التشغيل من التحضير للإطلاق إلى الصيانة بعد الهبوط

5.1. التحضير والإطلاق

يوضع المكوك المحمّل في حجرة الإطلاق قرب Batanga. تُختبر أنظمة المكوك أولاً، ثم أنظمة المسرّع. يلي ذلك اختبار بوابة العبور الغازية الديناميكية قبل الإطلاق. تُشحن الموصلات الفائقة على متن المكوك بالتيار، ثم يُشغّل الرفع المغناطيسي ويُختبر. يكون النفق مفرغاً من الهواء سلفاً. وعند صدور الأمر يبدأ إمداد قطاعات المسرّع الأولى بالطاقة النبضية.

5.2. التسريع داخل النفق

- **0–330 كم.** يبلغ التسارع الطولي الابتدائي ~4g. ويُستهلك جزء كبير من الطاقة في الرفع ومقاومة الجاذبية.
- **330–~1,800 كم، الجزء الهابط من المنحنى S.** ينخفض التسارع الطولي بسلاسة من 4g عند البداية إلى الصفر. يمر المكوك بالمنحنيات تحت الأرض ويتعرض لأحمال تصل إلى ~4g، فيما تثبّت العناصر الكهرومغناطيسية المحيطة مساره.
- **~1,800–2,050 كم، الجزء الصاعد من المنحنى S.** يتراجع التسارع إلى الصفر مع الاقتراب من البوابة. ويقطع المكوك آخر 50 كم بالقصور الذاتي بسرعة ~11 كم/ث.



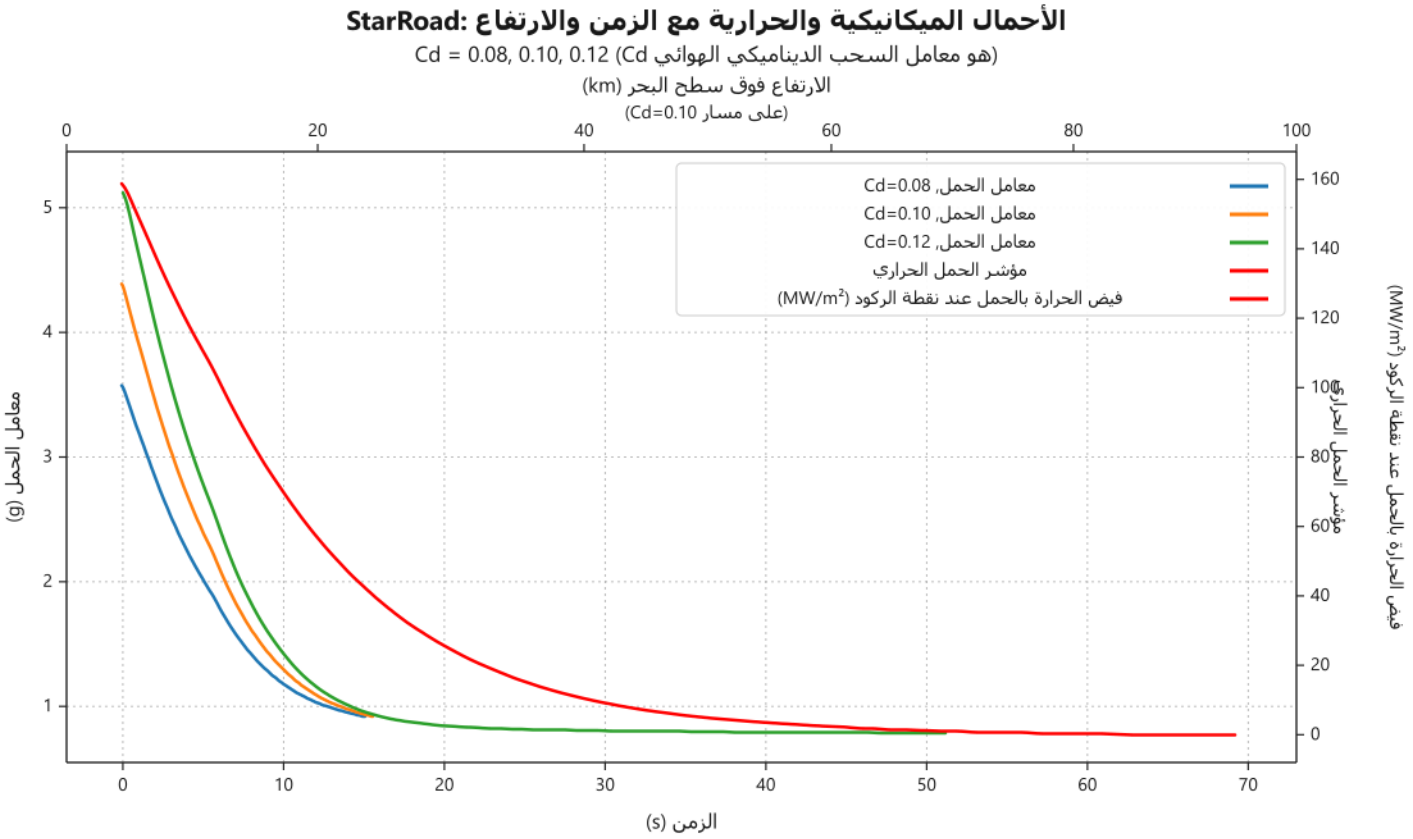
5.3. الخروج عبر البوابة الجوية

- بفضل ارتفاع نقطة الإطلاق، يتجاوز المكوك ارتفاع 10 كم فوق سطح البحر بعد نحو 30 كم فقط من بوابة الغلاف الجوي، ما يقلل أثر الموجة الصدمية في المنطقة إلى أدنى حد. وقبل إطلاق المكوك بدقيقة واحدة تُشغّل حلقات البوابة الغازية الديناميكية اختبارياً من دون فتح البوابة الميكانيكية. وبعد أن يقطع المكوك 45% من مسار النفق، تمرر الحلقات تياراً فوق صوتي من الهواء المضغوط الذي جمعته مضخات القطاع الأخير أثناء تفريغ النفق. وقبل مرور المكوك بنحو 10 ثوانٍ يُضخ الهيدروجين ويُفعّل الحاجز الغازي الديناميكي في وضع الاحتراق الرئيسي، فينشأ تيار مخروطي ثابت وفوق صوتي من غاز ساخن متأين جزئياً. وبعد نجاح تفعيل الحلقات وتكوين مخروط التدرج الحاجز الساخن بثلاث ثوانٍ تُفتح البوابة الميكانيكية.
- يمنع الحاجز أيضاً فقدان الفراغ داخل النفق ويخفف الصدمة الحرارية الأولى. ويعبر المكوك خلال أجزاء من الألف من الثانية منطقة معدّة سلفاً من غاز مخلخل ومسخن. تغيّر هذه التقنية الأساسية التوزيع الزمني للتأثير الديناميكي الهوائي الأول، فتزيل جبهة الصدمة الشديدة القصر عند الانتقال بين الوسطين.
- لا يقلل الحاجز الغازي الديناميكي مجموع القوى الديناميكية الهوائية، بل ينقل حمل الصدمة من نطاق الميكروثانية إلى نطاق الملي ثانية، ما يخفض بشدة الإجهادات الموضعية والاهتزازات والصدمة الحرارية في هيكل المكوك.
- تُفتح البوابة الميكانيكية فور مرور المركبة؛ ثم تُوقف حلقات النفث من دون تأخير.

5.4. عبور الغلاف الجوي

يتبع المكوك مساراً بالستياً ويستخدم كتلته القصورية وبنيته المتينة لاختراق طبقات الغلاف الجوي الكثيفة. وتبلغ الأحمال الحرارية والديناميكية ذروتها خلال أول 10–20 ثانية.

- **توضيح أساسي. ما إن يغادر** المكوك منطقة الحاجز الغازي الديناميكي حتى يتفاعل مباشرة مع الغلاف الجوي العادي عند الارتفاع المحدد، أي نحو 3,400 م. وتفترض جميع حسابات المسار والتدفق الحراري والأحمال تفاعلاً ديناميكياً هوائياً كاملاً مع الغلاف الجوي، من دون افتراض وجود «درع غازي» أو «قناة» أو حيز مخلخل يرافق المكوك.



5.5. دخول الفضاء والعمليات المدارية

بعد مغادرة الغلاف الجوي تُفتح المشعات لتبديد الحرارة. ثم يشغّل المكوك محركات البلازما الكهرومغناطيسية على متنه لإجراء تصحيحات دقيقة للمسار والوصول إلى المدار المستهدف، وغالباً ما يكون ذلك مباشرة إلى ما بعد المدار الثابت بالنسبة إلى الأرض أو نحو نقاط Lagrange. بعدها تُنشر الحمولة. وفي تكوين AstroLiner-S تُنجز عملية الإدخال النهائية وتصحيح المدار بمنظومة دفع كيميائي.

5.6. مغادرة المدار والعودة

تستخدم نسخة AstroLiner الكاملة محركات البلازما الكهرومغناطيسية لمغادرة المدار. أما في تكوين AstroLiner-S فتتولى منظومة الدفع الكيميائي الكبح لمغادرة المدار والتصحيحات والمناورات النهائية.

5.7. الهبوط في المحيط

فوق المحيط الأطلسي قرب Gabon، تُفتح منظومة مظلات كبح لتخفيض السرعة. ويهبط المكوك على الماء بزاوية هجوم صغيرة فوق قاعه المتين المصمم لتحمل تماس السطح الساخن مع الماء البارد. وبعد الهبوط تُنشر المراوح أو الدافعات المائية.

5.8. السحب والصيانة

تنقل محركات المكوك الذاتية، التي يغذيها المفاعل على متنه، أو قاطرات الاستعداد عند تعطل أنظمته، المركبة إلى مجمع الميناء للفحص والصيانة وإصلاح الحماية الحرارية والاستعداد للرحلة التالية. وفي تكوين AstroLiner-S تؤمّن البطاريات أو وحدة طاقة مساعدة أو قاطرات الاستعداد العودة إلى الميناء.

6. التنفيذ والجدول والمتطلبات والمراكز الصناعية

6.1. مراحل المشروع

خُطط لتنفيذ StarRoad في سلسلة مراحل مترابطة تقنياً ومبررة اقتصادياً. لكل مرحلة أهداف واضحة ومعايير للنجاح، وهي تنشئ البنية اللازمة للمرحلة التالية مع خفض المخاطر التقنية والمالية.

6.1.1. المرحلة 0: المفهوم والاختبارات (2–5 سنوات)

- **الهدف:** التحقق من المبادئ الفيزيائية، وتطوير التقنيات الحرجة في المختبر، وتكوين قاعدة هندسية للمراحل اللاحقة.
- **الأعمال الرئيسة**

1. نمذجة رياضية وCFD تفصيلية لجميع العمليات: التسريع، وتشغيل بوابة العبور، والصدمة الهوائية.
2. تشكيل اتحاد دولي والتوصل إلى اتفاقات سياسية وقانونية أولية.
3. إجراء مسح جيولوجي وبيئي على امتداد المسار كله.
4. إنشاء مواقع اختبار بحثية خارج الموقع الرئيسي:

   اختبارات منصية لوحدات التعليق فائقة التوصيل وأنظمة الطاقة النبضية؛

   بناء واختبار نموذج بمقياس 1:10 للبوابة الغازية الديناميكية لإثبات إمكان إنشاء حاجز متدرج مستقر؛

   حفر نفق تجريبي مفرغ قصير بطول 1–2 كم للتحقق من تكامل أنظمة الفراغ والتسريع المغناطيسي لأجسام اختبار خفيفة وأنظمة السلامة.

- **معيار النجاح:** بيانات تجريبية تؤكد جدوى الحلول الأساسية — البوابة والرفع والتثبيت — والجاهزية للتصميم الهندسي التفصيلي للمرحلة 1.

6.1.2. المرحلة 1: البنية التحتية ومرتكز الطاقة (5–7 سنوات)

- **الهدف:** إنشاء «العمود الفقري للطاقة» وتطوير البناء الروبوتي في ظروف الموقع الفعلية.
- **الأعمال الرئيسة**

1. بدء إنتاج محدود لأنظمة روبوتية معيارية لحفر الأنفاق بقطر مترين.
2. حفر الزوج الأول من أنفاق التجميع الرئيسية لمنظومة الطاقة الحرارية الجوفية الذاتية بالتوازي على امتداد المسار كله (نحو 2,050 كم)، لإنشاء دائرة التثبيت الحراري الأولية.
3. إنشاء أولى المحطات الحرارية الجوفية التي تستخدم CO_2 فوق الحرج الملتقط مباشرة من الهواء (DAC) عند النقاط الرئيسة على المسار.
4. حفر نفق اختبار نموذجي صغير القطر فوق مجمّعات النظام الجوفي — D=2 م وL=2,050 كم — وتجهيزه بأنظمة أساسية للفراغ والاتصالات والخدمة.

- **معيار النجاح:** تعمل المنظومة الدنيا للنظام المستقل للطاقة الحرارية الجوفية بكامل وظائفها وباستقلال في الطاقة؛ وتثبت عملية الحفر الروبوتي السريع، فتتكون قاعدة التوسع اللاحق.

6.1.3. المرحلة 2: التحقق محدود النطاق (صفة «المجمع العلمي والأداتي») (4–6 سنوات)

- **الهدف:** التحقق من تزامن الأنظمة وسلامتها عند سرعات واقعية وجمع بيانات تجريبية فريدة.
- **الأعمال الرئيسة**

1. تسريع أجسام اختبار خاملة تصل كتلتها إلى عدة أطنان وكبحها داخل نفق الاختبار الصغير بسرعات من 1 إلى 11 كم/ث.
2. اختبار كامل لمجسم بوابة غازية ديناميكية بمقياس 1:5، مع مرور مركبة تجريبية صغيرة.
3. اختبار فرضية «الكبش القصوري» تجريبياً بإطلاق كتل اختبار مختلفة البنية والحماية الحرارية لقياس أحمال التسارع والتدفقات الحرارية.
4. بدء التصميم التفصيلي وتصنيع النماذج الأولية للأنظمة الأساسية في مركبة كاملة الحجم، بما فيها المغناطيسات فائقة التوصيل ومراكم الحرارة.

- **معيار النجاح:** تعمل جميع أنظمة التزامن بثبات وأمان؛ تثبت فعالية البوابة الغازية الديناميكية؛ تؤكد التجارب انخفاض الحمل النوعي مع زيادة الكتلة؛ ويكتمل التصميم الأولي للمكوك.

6.1.4. المرحلة 3: مقطع كامل الوظائف ونموذج المركبة (4–7 سنوات)

- **الهدف:** دمج الأنظمة واختبارها في تكوينها النهائي على مقطع كبير وإنشاء نموذج صالح للطيران.
- **الأعمال الرئيسة**

1. إنشاء مقطع كامل الوظائف بطول 50–200 كم من نفق التسريع الرئيسي، بمقطعه النهائي 17.5 × 12.5 م، شاملًا كل الملفات ومخازن الطاقة ونفق الخدمة.
2. توسيع النظام الحراري الجوفي تحت هذا المقطع إلى تكوينه الكامل المؤلف من سبعة أنفاق.
3. تصنيع نموذج مكوك بالحجم الكامل من دون منظومة دفع وإخضاعه لاختبارات أرضية شاملة تشمل الأنظمة المبردة والبنية والحماية الحرارية.
4. اختبارات نفق متكاملة: تسريع كتل ممثلة للمركبة وكبحها تحت أحمال تصل إلى 8g وسرعات تصل إلى نحو 4 كم/ث. والتحقق من جميع بروتوكولات الطوارئ (إنذار 1–3).
5. تطوير مفاعل نووي مدمج على متن النسخة كاملة الوظائف من AstroLiner، واختباره أرضياً واعتماده.

- **معيار النجاح:** تنجح دورات متكررة من التسريع والتوقف الطارئ من دون أضرار حرجة؛ تثبت فعالية استعادة الطاقة؛ ويصبح مكوك الطيران والمفاعل جاهزين للدمج النهائي.

6.1.5. المرحلة 4: تمديد الطول وبدء التشغيل (10–15 سنة)

- **الهدف:** استكمال الخط الأول ودمج المكوك والوصول إلى سرعة التشغيل.
- **الأعمال الرئيسة**

1. زيادة طول نفق التسريع تدريجياً حتى طوله التصميمي البالغ 2,050 كم، بتشغيل عدد كبير من آلات حفر الأنفاق بالتوازي.
2. توسيع بنية النظام الحراري الجوفي ومخازن الطاقة النبضية على امتداد المسار كله.
3. بناء المجمع النهائي لبوابة عبور الغلاف الجوي على ارتفاع عالٍ فوق جبل موهي.
4. دمج أنظمة المكوك الداخلية وإجراء اختبارات أرضية واختبارات منخفضة السرعة داخل النفق.
5. عمليات إطلاق مرحلية مع زيادة السرعة والكتلة تدريجيًا حتى بلوغ قيم التصميم: 15,000 طن ونحو 11 كم/ث.

- **معيار النجاح:** يضع أول إطلاق ناجح للمكوك بسرعة فرط صوتية حمولة على مدارها المستهدف، ويتحقق معدل الإطلاق التصميمي، أي عملية أو عمليتان شهرياً.

6.1.6. المرحلة 5: التوسع والتشغيل الصناعي (مستمر)

- **الهدف:** تحويل StarRoad إلى بنية تحتية عالمية تتوسع باستمرار.
- **الأعمال الرئيسة**

1. تشغيل الخط الأول وضبط دورات الخدمات اللوجستية: التحميل والصيانة والعودة.
2. بدء إنشاء الخط الثاني والخطوط المتوازية التالية لزيادة تدفق البضائع.

3. إنشاء أحواض بناء سفن مدارية ومرافق معالجة انطلاقاً من المراكز الصناعية للمشروع.
4. تطوير شبكة من «الفروع»: مسرّعات أقصر لنقل الأشخاص والحمولات الخاصة.

- **معيار النجاح:** تنخفض كلفة النقل إلى المدار دون 10 دولارات/كغ؛ تصبح عمليات الإطلاق يومية؛ وتوجد خطة معتمدة للخطوط الرئيسة التالية ويكون تنفيذها قد بدأ.

6.2. المراكز الصناعية

- **المجمع الساحلي (مصب نهر نيانغا، الغابون):** بناء المركبات، وإنتاج وحدات مقاطع النفق الأولى، والميناء الرئيسي لصيانة المركبات.
- **مجمع المرتفعات (جبل موهي والهضبة الجنوبية، جمهورية الكونغو** الديمقراطية): إنتاج وحدات المقاطع عالية السرعة والمنحنى الأخير على شكل S، وتجميع آلية البوابة وصيانتها. يضم الموقع منظومة بثلاث قنوات لتحليل الهيدروجين كهربائيًا وتخزينه؛ وحتى في الطوارئ تستطيع كل قناة منفردة تزويد حلقات المحركات الثلاث في الحاجز الغازي الديناميكي للبوابة بالوقود. وتأتي كهرباء التحليل من مصادر محلية مرتبطة بشبكة المشروع — منظومة الطاقة الحرارية الجوفية الذاتية، والطاقة المائية، والشمسية، والنووية.

6.3. الإطار الزمني العام

لأن المشروع يتطلب تقنيات وحلولًا هندسية متقدمة كثيرة لكنها قابلة للتنفيذ حاليًا، وآلات عديدة لحفر الأنفاق تعمل بالتوازي، وإنشاء البنية التحتية ومركزي تصنيع، فإن تنفيذ النفق الأول من بدء المرحلة 0 حتى أول إطلاق تجاري في المرحلة 4 سيستغرق نحو 25–40 عامًا. وهذا مماثل لأزمنة مشروعات العلوم العملاقة الأخرى مثل ITER وLIGO. وفي هذه الظروف يعتمد التقدم أساسًا على التمويل والتنسيق الدبلوماسي والقانوني، لا على الجدوى التقنية الجوهرية. المهمة طموحة، لكنها قد تكون قابلة للتحقيق بواسطة ائتلاف عالمي.

7. المشكلات والمهام التي يعالجها المشروع

7.1. الاحترار العالمي المفرط

نقل الصناعات كثيفة استهلاك الطاقة إلى الفضاء لخفض التلوث الحراري والضغط على المحيط الحيوي للأرض.

7.2. المهمة الاقتصادية

خفض كلفة الوصول جذرياً كي تصبح طاقة الشمس والكويكبات وموارد القمر ثم الكواكب مجدية اقتصادياً.

7.3. الهدف الاستراتيجي

إنشاء نظام رفع متين مستقل عن الطقس يدعم التصنيع المداري والدفاع الكوكبي.

7.4. محفز تقني

تحفز المشروع تقنيات القدرة النبضية والموصلية الفائقة والسرعات الفرط صوتية والدفع النووي وحفر الأنفاق الروبوتي.

7.5. الاستقلال في الطاقة والتحكم الحراري

يعالج النظام المستقل للطاقة الحرارية الجوفية (النظام الجيوحراري الذاتي) المطلبين معاً. فهو يولّد قدرة كهربائية مستمرة تصل إلى نحو 15 GW، فتغطي طلب المسرّع كاملاً وتنتج فائضاً تجارياً، ويحافظ في الوقت نفسه على بيئة باردة قابلة للتنبؤ حول النفق الرئيس. وبذلك يصبح البناء والتشغيل ممكنين في طبقات عميقة نشطة حرارياً جوفياً، وينتهي الاعتماد على توليد خارجي معرض للانقطاع وعلى طقس متقلب.

7.6. البصمة الكربونية

يتبنى StarRoad نموذج الخدمة البيئية النشطة. فالمشروع أكبر مستهلك ثابت لـCO_2 الجوي في العالم، إذ يبقى الغاز في حالته فوق الحرجة مائعاً عاملاً دائماً داخل دورة جيوحرارية مغلقة. تُنتزع ملايين الأطنان من ثاني أكسيد الكربون من الدورة الجوية وتُحبس في الدائرة التقنية قروناً. وبذلك يصبح StarRoad أداة قوية لهندسة المناخ تعوض انبعاثات قطاعات صناعية كاملة.

7.7. الإمكانات الاجتماعية والبيئية للقناة الرئيسية الحرارية المائية

القناة الحرارية المائية الرئيسية ليست مجرد عنصر تبريد، بل بنية عابرة للقارة مزدوجة الاستخدام تفيد المنطقة:

- **الري. تتيح** بوابات التحويل استخدام ماء القناة لري الأراضي الزراعية على امتداد المسار وتحويل المناطق الجافة إلى «حزام أخضر» لأفريقيا.
- **التجدد الطبيعي. تمتلئ** القناة تلقائياً بفضل الأمطار الاستوائية المتكررة.
- **معالجة المياه الحرارية.** بعد أن ترفع مبادلات الحرارة الجوفية حرارتها إلى +60°C، تصبح المياه مبسترة عملياً وصالحة للري الآمن والاستخدام الصناعي، وبعد الترشيح للاستخدام المنزلي ومياه الشرب.
- **الجريان بالجاذبية.** بفضل الانحدار الطبيعي، من 3,400 م شرقاً إلى 0 م غرباً، يجري الماء من دون مضخات ويوفر دوراناً مجانياً.
- **الكهرومائية** الصغيرة . يسمح فرق الارتفاع بإنشاء سلسلة محطات كهرومائية صغيرة تولد طاقة متجددة إضافية للشبكات المحلية وللاكتفاء الذاتي.

وهكذا يصبح StarRoad منصة للنقل والزراعة والطاقة معاً، مندمجة في التنمية المستدامة للمنطقة.

7.8. شبكة الطاقة

تمنح المنظومة الجيوحرارية وشبكة محطات الكهرباء طاقة «خضراء» فائضة لا للمسرّع وحده، بل للمدن والمصانع والمزارع المجاورة أيضاً.

7.9. StarRoad شريان اقتصادي

من جهة تصبح StarRoad بوابة شحن كوكبية لتطوير النظام الشمسي، ومن جهة أخرى شريان أفريقيا الاقتصادي ومحفز التصنيع واستقلال الطاقة والأمن الغذائي. ليست منشأة معزولة تحت الأرض؛ فبنيتها السطحية—40 محطة طرفية ومركزان صناعيان في الغابون وجمهورية الكونغو الديمقراطية وقناة حرارية مائية رئيسية وشبكة طرق—تكوّن تجمع تنمية مستدامة خطياً يعبر وسط أفريقيا غرباً وشرقاً. وعلى طول 2,050 كم ينشأ مشهد بيئي وتقني وزراعي متعاقب، ومنطقة اقتصادية مكتفية فيها:

- تنتج الطاقة من الحرارة الجوفية والكهرومائية الصغيرة والشمس؛
- يزرع الغذاء بالري؛
- تصنع مكونات المكوك ووحدات النفق والمعدات؛
- تنقل البضائع بالطرق والسكك؛
- يعمل ميناء فضائي يضم مجمع الإطلاق والبوابة الجوية؛
- تزيل محطات الالتقاط المباشر CO_2 من الجو.

7.10. سلامة البنية التحتية الحرجة

يتضمن المشروع منذ البداية تدابير للتعامل الآمن مع كميات كبيرة من الهيدروجين وسرعات فرط صوتية وطاقة بمقياس الغيغاواط. وتُدمج الحماية السلبية مع الرصد النشط والاستجابة الآلية، بما يضع معيار سلامة جديداً للمنشآت الكبرى للطاقة ولأنظمة الهيدروجين.

7.11. اختيار الموقع وقابلية التوسع

يجب أن يجمع موقع بوابة العبور عشرات المتطلبات المتعارضة: الارتفاع واللوجستيات والسلامة وقابلية التوسع والقانون. يتيح جبل موهي والهضبة المجاورة أن يبدأ StarRoad في موقع مرتفع صغير ثم ينمو إلى أكبر ميناء فضائي في العالم من دون الانتقال إلى موقع آخر.

7.12. التنسيق السياسي والقانوني لمشروع عابر للقارة

تعالج الدول الثلاث بنموذج كونسورتيوم دولي مثل CERN وITER. وتُمنح البنية التحتية وأصول نظام الطاقة الحرارية الجوفية الذاتي وضعاً قانونياً خاصاً، وتقسم المنافع بوضوح. ليس المشروع عبئاً يفترض الاستقرار؛ بل يصنعه ويحفظه بالاعتماد المتبادل والوصول المميز إلى المستقبل وتقنيات البناء.

7.13. النمو التطوري لتدفق البضائع

تنمو الوتيرة مع الصناعة المدارية: إطلاق شهري في مرحلة الريادة ينشئ الأحواض؛ و1–3 أسبوعياً في المرحلة الصناعية يبني الأصول؛ وإطلاق يومي في النضج يدعم النمو الأسي للاقتصاد الفضائي.

8. الأسواق والخدمات اللوجستية المدارية

يجيب هذا القسم عن السؤال المركزي لجدوى StarRoad الاقتصادية: ما الذي يمكن إطلاقه بكميات تكفي لاستغلال ممر إطلاق فائق الثقل؟ ليست StarRoad منظومة لمهام نادرة منفردة، بل تستهدف تدفقاً صناعياً منتظماً وضخم الحجم للبضائع بين الأرض والمدارات العالية.

لا يتمثل سوق StarRoad الأول في كوكبات المدار الأرضي المنخفض أو المركبات العلمية المنفردة، بل في الطاقة المدارية واسعة النطاق والبنية الحاسوبية واللوجستيات بين المدارات والمستوطنات وأحواض بناء السفن والصناعات خارج الأرض التي تليها.

8.1. مشكلة الطلب على الإطلاقات فائقة الثقل

لا تقيد اقتصاديات الصواريخ كلفة الكيلوغرام وحدها، بل طبيعة الإطلاق أيضاً: تنقل الصواريخ البضائع في دفعات صغيرة منفصلة، مع نسبة كبيرة من الكتلة المساندة وتجميع معقد في المدار وعمليات فردية كثيرة. لذلك تبقى صاروخيات النقل لوجستيات بعثات حتى مع انخفاض السعر.

تنشئ StarRoad سوقاً من نوع آخر. فغايتها ليست إطلاق حمولات اليوم بسعر أقل فحسب، بل إتاحة حمولات لا تصبح مجدية اقتصادياً قط في لوجستيات الصواريخ.

تشمل هذه الحمولات:

- محطات طاقة شمسية فضائية كاملة أو شبه كاملة بقدرة غيغاواط؛
- مراكز بيانات مدارية كبيرة؛
- وحدات نقل الطاقة بالموجات الصغرية؛
- جمالونات ومشعات ومرايا وألواح كبيرة؛
- أحواض بناء سفن مدارية وخطوط تجميع مؤتمتة؛
- وحدات سكنية وصناعية عند EML4/5؛
- قاطرات وناقلات بين مدارية؛
- وحدات وقود وطاقة وخدمة؛
- مكونات بنية مستقبلية للكويكبات والرحلات بين الكواكب.

لذلك لا تعتمد StarRoad على سوق الإطلاق الفضائي الحالي. فهي تنشئ سوقاً جديدة، كما لم تكتف السكك الحديدية والنقل بالحاويات وشبكات الكهرباء بالطلب القائم، بل أنشأت اقتصادات جديدة حولها.

8.2. السوق الأولية: الطاقة الشمسية الفضائية ومراكز البيانات المدارية

ينبغي أن تكون محطات الطاقة الشمسية الفضائية بقدرة غيغاواط الحمولة التجارية والاستراتيجية الرئيسية في المرحلة الأولى. وهي منصات طاقة كبيرة ذاتية الانتشار كلياً أو جزئياً ينقلها AstroLiner-S مباشرة إلى مداراتها أو مواقع تشغيلها.

تلبي محطات الطاقة الشمسية الفضائية احتياجات عدة معاً:

- تنشئ طلباً ضخماً ومتكرراً على الإطلاقات فائقة الثقل؛
- تقيم سوق طاقة مستقلة عن تعاقب الليل والنهار ومعظم الطقس؛
- تتيح وضع جزء كبير من التوليد الجديد خارج سطح الأرض؛
- توفر أساس تغذية الصناعة المدارية بالطاقة؛
- تخلق سبباً اقتصادياً لبناء اللوجستيات المدارية وأحواض السفن ومستوطنات الخدمة.

يبلغ الثابت الشمسي عند مدار الأرض **نحو 1,361.6** واط/م². لذا يقابل غيغاواط واحد من ضوء الشمس الساقط مساحة تجميع مثالية التوجيه تقارب 0.74 كم². ومع كفاءة كهروضوئية 25–35% وفواقد التحويل والنقل والفجوات الإنشائية والمشعات وإلكترونيات القدرة والاحتياط والتدهور، تبلغ المساحة الفعلية اللازمة لغيغاواط واحد مفيد عدة كيلومترات مربعة. هذا كبير بمقاييس المركبات التقليدية، لكنه طبيعي في StarRoad حيث لا تبقى الكتلة والمساحة والأبعاد الإنشائية القيد الأساسي.

8.2.1. مراجع كتلة الطاقة الشمسية الفضائية بقدرة غيغاواط

محطة الغيغاواط ليست قمراً صغيراً. حتى التصاميم المتفائلة تضع كتلة محطة 2 GW عند عدة آلاف من الأطنان. تُقدّر أخف التصورات مثل CASSIOPeiA بنحو 2,000 طن، فيما تعطي دراسات NASA الأكثر تحفظاً 5,900–10,000 طن لنظام 2 GW مماثل.

صلته بـ StarRoad	الكتلة	القدرة	المشروع / الدراسة
المرجع الأوثق صلة بـ StarRoad: GEO/GSO، معامل توليد 99.7%، قمر واحد لكل هوائي تقويم (ريكتينا)، وقدرة نوعية تقارب 1 MW/t في أفضل الحالات.	نحو 2,000 طن	حتى 2 GW إلى الشبكة	**CASSIOPeiA / Space / Energy Initiative Frazer-Nash**

صلته بـ StarRoad	الكتلة	القدرة	المشروع / الدراسة
تقدير أكثر تحفظاً. تطبّع NASA النظام على 2 GW مسلمة إلى الشبكة؛ ويحمل RD1 نحو 11.5 كم² من الألواح الشمسية.	نحو 5,900 طن	2 GW إلى الشبكة	**NASA 2024 RD1 / Innovative Heliostat Swarm**
تعطي NASA كتلة نحو 10 ملايين كغ ومساحة ألواح تقارب 19 كم². ولأن RD2 يولد مدة أقصر، تلزم خمسة أنظمة RD2 لمعادلة طاقة RD1 واحد تقريباً.	نحو 10,000 طن	2 GW إلى الشبكة عبر عدة أنظمة	**NASA 2024 RD2 / Mature Planar Array**
مرجع ثقيل. يعطي التحجيم التقريبي إلى متوسط 2 GW نحو 50,000 طن أو أكثر، أي سلسلة رحلات وتجميع مداري لا إطلاقاً واحداً.	نحو 20,000 طن لكل نظام	متوسط 0.75 GW / أقصى 1.2 GW	**JAXA / Sasaki Tethered-SPS**
عند 160 غ/م² وكفاءة شاملة 7–14% يغطي هذا التقدير الطبقة الفعالة فقط. وتحتاج المحطة الكاملة إلى الهيكل ونقل الطاقة والتحكم بالاتجاه والمشعات والأسلاك والإلكترونيات وتجهيزات الصيانة والاحتياطي.	الطبقة الفعالة وحدها نظرياً نحو 1,700–3,400 طن لتسليم 2 GW إلى الأرض	ليست محطة 2 GW كاملة بل وحدة تقنية	**Caltech SSPP / بلاطة معيارية خفيفة**

تؤدي الأرقام إلى نتيجة مركزية: **تلائم محطة 2 GW بكتلة 2,000–10,000 طن مجال AstroLiner بدقة** تقريباً. وهي في StarRoad إطلاق واحد فائق الثقل أو عدد محدود من الرحلات مع أقل تجميع مداري. أما اللوجستيات الصاروخية فتحتاج عشرات أو مئات إطلاقات الصواريخ فائقة الثقل وسلاسل تزويد وتجميعاً مدارياً وقطراً إلى GEO أو EML وتعقيداً تشغيلياً حاداً.

8.2.2. إنتاج محطة شمسية فضائية واحدة بقدرة 2 GW

وفق الافتراضات الأساسية:

- القدرة المسلمة إلى الشبكة: **2** GW؛
- الإتاحة / معامل التوليد: **99.7%**؛
- العمر التصميمي: 30 **سنة**؛

تنتج محطة واحدة:

- **نحو 17.47 TWh سنوياً**؛
- **نحو 524 TWh** خلال 30 سنة.

وهذا يجعل كلفة النقل لكل كيلوغرام حاسمة. يبقى الإطلاق الحاجز الأكبر بالصواريخ، أما مع StarRoad فيهبط عنصر النقل سريعاً إلى حصة صغيرة من سعر الطاقة المستقبلي.

8.2.3. عنصر النقل في كلفة الطاقة الشمسية الفضائية

يحسب الآتي عنصر **النقل فقط من الكلفة** المستوية للطاقة: كلفة إيصال كتلة المحطة مقسومة على إنتاجها طوال 30 عاماً. ولا يشمل تصنيع المحطة والريكتينا والصيانة والتأمين واستبدال الوحدات والبنية الأرضية وربح المشغل.

الصيغة:

عنصر النقل في LCOE = كتلة المحطة × كلفة الإيصال / إنتاج الطاقة طوال العمر

يبلغ إنتاج محطة 2 GW بإتاحة 99.7% وعمر 30 سنة نحو 524 **مليار kWh**.

المرحلة / نظام النقل	كلفة الإيصال	محطة شبيهة بـ CASSIOPeiA، 2,000 طن، ¢/kWh	NASA RD1، 5,900 طن، ¢/kWh	NASA RD2، 10,000 طن، ¢/kWh
اللوجستيات الصاروخية الحالية، المرجع الأدنى إلى GTO	3,600$–5,600 kg	2,14–1,37	6,31–4,05	10,69–6,87
StarRoad، السنتان 1–2	80$–120 kg	0,0458–0,0305	0,1351–0,0901	0,2290–0,1527
StarRoad، السنوات 3–5	30$–50 kg	0,0191–0,0114	0,0563–0,0338	0,0954–0,0572
StarRoad، السنوات 6–10	10$–20 kg	0,0076–0,0038	0,0225–0,0113	0,0382–0,0191
StarRoad، السنوات 11–15	3$–8 kg	0,0031–0,0011	0,0090–0,0034	0,0153–0,0057

المرحلة / نظام النقل	كلفة الإيصال	محطة شبيهة بـ CASSIOPeiA، 2,000 طن، ¢/kWh	NASA RD1، 5,900 طن، ¢/kWh	NASA RD2، 10,000 طن، ¢/kWh
StarRoad، السنوات 16–25	0.8–3 $/kg	0,0011–0,0003	0,0034–0,0009	0,0057–0,0015
StarRoad، السنة 26 وما بعدها	0.3–1 $/kg	0,0004–0,0001	0,0011–0,0003	0,0019–0,0006

للمقارنة، تبلغ LCOE لمحطات أرضية حديثة جديدة عدة سنتات لكل kWh: نحو 3–4 ¢/kWh لطاقة الرياح البرية، و4–5 ¢/kWh للطاقة الشمسية الكبيرة، و5–6 ¢/kWh للكهرومائية. وتقدّر NASA البدائل الأرضية عام 2050 بنحو 2–5 ¢/kWh.

النتيجة المهمة أن عنصر النقل في StarRoad أدنى بمرتبة عشرية من LCOE الأرضية حتى في الفترة التجريبية، ويكاد يختفي سعرياً عند النضج. لا يعني ذلك أن الكلفة الكلية أجزاء ألفية من السنت؛ فالتصنيع والريكتينا والخدمة والإلكترونيات والمشعات والاستبدال والتأمين والربح باقية. إنما تزيل StarRoad حاجز النقل الذي يجعل الطاقة الشمسية الفضائية باهظة في اللوجستيات الصاروخية.

الواقع الصاروخي أسوأ من رقم 3,600–5,600 $/kg وحده. يجب إيصال المحطة إلى موقعها وتجميعها وصيانتها وتزويد القاطرات وحفظ البنية. لذلك تقدّر NASA خط أساس LCOE بنحو 61 ¢/kWh لـ RD1 و159 **¢/kWh** لـ RD2. **لا تخفض** StarRoad كلفة الإطلاق فحسب، بل تستبدل آلاف العمليات الصاروخية برحلة بنية تحتية فائقة الثقل أو بضع رحلات، فتغير طبيعة المسألة.

8.2.4. مراكز البيانات المدارية بوصفها السوق الأولية الثانية

قد تشكل مراكز البيانات المدارية السوق الثانية. يجعل نمو الذكاء الاصطناعي والحوسبة السحابية والبنية الرقمية مراكز البيانات جزءاً مهماً من الطلب العالمي على الطاقة. وتقدّر IEA أنها تستهلك مئات TWh سنوياً وقد تقترب من 1,000 TWh سنوياً خلال العقد المقبل.

يوفر وضع جزء من الحوسبة قرب محطات الطاقة الشمسية الفضائية مزايا:

- وصول مباشر إلى توليد مداري مستمر؛
- طلب أقل على شبكات الأرض؛
- إمكان بناء حقول مشعات كبيرة في الفراغ؛
- اعتماد أقل على قيود الأرض والمياه وسعة الشبكة؛
- تقاسم الطاقة والاتصالات والخدمة مع المحطات الشمسية.

في المرحلة الأولى يمكن إطلاق محطات الطاقة ومراكز البيانات منفصلة أو مجمعات طاقة وحوسبة تضم محطة شمسية وإلكترونيات قدرة ومشعات ووحدة حوسبة وهوائيات اتصال ودائرة إرسال بالموجات الصغرية.

8.3. المبرر المناخي والصناعي للطاقة الشمسية الفضائية

لا يصح وصف محطات الطاقة الشمسية الفضائية بأنها مجرد تقنية «خضراء». فدورها أوسع: يمكنها أن تحل محل التوليد الكربوني لا عبر خفض مستوى الراحة وفرض قيود على الاستهلاك، بل بإنشاء منظومة طاقة أشد قدرة.

غالباً ما تُفهم سياسة المناخ التقليدية على أنها تطالب المجتمع بالتضحية بالراحة لخفض الانبعاثات. ويقدم StarRoad مساراً آخر: بدلاً من تقليص قدرة الحضارة، يوضع معظم التوليد الجديد في الفضاء وتتسع الطاقة المتاحة من دون زيادة انبعاثات الكربون في قطاع الكهرباء.

لا يقتضي هذا النموذج اختفاء الهيدروكربونات كمورد صناعي. يمكن إخراجها تدريجياً من توليد الكهرباء والحرارة على نطاق واسع، مع الإبقاء عليها وتوجيهها إلى الكيميائيات والمواد والمركبات الكربونية والمنتجات الاصطناعية وسلاسل الإنتاج التي يكون فيها الكربون مادة أولية لا وقوداً.

بالنسبة إلى صناعات الطاقة الكربونية القائمة اليوم، لا يمثل ذلك تهديداً فقط بل طريقاً للانتقال أيضاً. ويمكن منح الشركات والدول والصناديق المرتبطة ببنية النفط والغاز والفحم فرصاً استثمارية ذات أولوية في الطاقة الشمسية الفضائية والطاقة المدارية وكيمياء الهيدروكربونات والمواد الكربونية. عندها يصبح StarRoad آلية لتحويل منظم لصناعات الطاقة الراسخة، لا مجرد منافس لها.

8.3.1. حجم إحلال الطاقة

ينتج كل غيغاواط من القدرة الكهربائية المستمرة نحو **8.76 TWh سنوياً**. وتنتج محطة شمسية فضائية بقدرة 2 GW تعمل بنسبة إتاحة 99.7% نحو **17.47 TWh سنوياً**.

وعليه:

- يولد 100 GW من القدرة المدارية نحو **876 TWh سنوياً**؛
- ويولد 1 TW من القدرة المدارية نحو **8,760 TWh سنوياً**؛
- ويولد 3 TW من القدرة المدارية **نحو 26,280** TWh سنوياً، وهو مقدار يقارب الاستهلاك العالمي السنوي الحالي للكهرباء.

بلغ توليد الكهرباء عالمياً في 2024 نحو **30.8 ألف TWh**، أسهمت المصادر الأحفورية منها بنحو 18.2 **ألف TWh. والمقياس** واضح: حتى الإحلال الجزئي للتوليد الكربوني يتطلب مئات أو آلاف الغيغاواط من القدرة الجديدة الموثوقة، لا عشرات فقط.

8.3.2. المعدل المحتمل للإحلال عندما تنقل عمليات إطلاق StarRoad محطات للطاقة الشمسية الفضائية

يعرض الجدول تقديراً تقنياً أعلى: ماذا يحدث إذا خصص جزء كبير من عمليات إطلاق StarRoad لنقل محطة واحدة بقدرة 2 GW **متصلة بالشبكة في كل** إطلاق. هذا ليس توقعاً ولا وعداً، بل تقدير لمعدل ممكن فقط عند تحقق شروط إضافية: الإنتاج المتسلسل، واكتمال هوائيات الاستقبال الأرضية ووصلات الشبكات، والقبول السياسي والقانوني، والتمويل والصيانة، وأسواق طاقة قادرة على استيعاب الإنتاج.

إجمالي توليد الكهرباء عالميًا في 2024، نحو 30.8 ألف تيراواط ساعة/سنة	التوليد من الوقود الأحفوري في 2024، نحو 18.2 ألف تيراواط ساعة/سنة	التوليد السنوي الجديد بعد النشر	القدرة الشمسية الفضائية الجديدة سنوياً	عمليات الإطلاق سنوياً في النموذج الاقتصادي	فترة تشغيل StarRoad
%1,4–0,7	%2,3–1,2	419–210 TWh/سنة	48–24 GW/سنة	24–12	**السنتان 1–2**
%5,7–2,8	%9,6–4,8	1,747–873 TWh/سنة	200–100 GW/سنة	100–50	**السنوات 3–5**
%17–11	%29–19	5,240–3,493 TWh/سنة	600–400 GW/سنة	300–200	**السنوات 6–10**
%40–28	%67–48	12,227–8,734 TWh/سنة	1,400–1,000 GW/سنة	700–500	**السنوات 11–15**
+%57	+%96	+17,467 TWh/سنة	+2,000 GW/سنة	+1000	**السنوات 16–25**
+%85	+%144	+26,201 TWh/سنة	+3,000 GW/سنة	+1500	**من السنة 26 فصاعداً**

يوضح الجدول لماذا تمثل الطاقة الشمسية الفضائية سوقاً أولية طبيعية لـStarRoad. فمحطة واحدة بقدرة 2 GW لكل إطلاق تخلق تدفقاً ملموساً للطاقة حتى في مرحلة التشغيل المبكرة، أما التشغيل الناضج فيصبح أداة بمقياس الكوكب.

يجب ألا يُقرأ الجدول بوصفه جدولاً زمنياً مضموناً لإزالة الكربون. فالإحلال الفعلي لن تحده قدرة StarRoad على الإطلاق وحدها، بل كذلك:

- معدل تصنيع محطات الطاقة الشمسية الفضائية؛
- إنتاج إلكترونيات القدرة والمشعات والجمالونات ومرسلات الموجات الدقيقة وأنظمة التحكم؛
- إنشاء هوائيات الاستقبال الأرضية؛
- قدرة شبكات الكهرباء؛
- الترخيص السياسي لنقل القدرة بالموجات الدقيقة؛
- التوزيع الدولي للمنافع والمخاطر؛
- التأمين على الطاقة المدارية وتنظيمها؛
- صيانة المحطات وإصلاحها والتخلص منها عند نهاية العمر؛
- المنافسة مع الطاقة الشمسية الأرضية والرياح والطاقة النووية والكهرومائية والحرارية الجوفية.

ومن ثم فالصياغة الدقيقة هي: **يجعل StarRoad معدل إحلال يضاهي حجم الكهرباء الأحفورية العالمية ممكناً تقنياً، لكن سرعة الانتقال الفعلية تحددها صناعة المحطات والشبكات وهوائيات الاستقبال والسياسات والأسواق.**

8.3.3. التحول الصناعي للطاقة الكربونية

إذا واكب تصنيع المحطات عمليات إطلاق StarRoad، أمكن بناء قدرة مدارية بمقياس التيراواط خلال عقد أو عقدين. ولن تلغي الطاقة الأرضية، بل ستغير دورها: تشكل الشبكات الأرضية والطاقة النووية والكهرومائية والمتجددة والمحطات الحرارية الجوفية والتخزين منظومة هجينة، يمد فيها التوليد المداري طبقات الحمل الأساسي والصناعة والتصدير بالطاقة.

في هذا السيناريو لا «تخسر» الطاقة الكربونية ببساطة، بل تحصل على مسار للتحول:

- تخرج محطات الفحم والغاز تدريجياً من توليد الحمل الأساسي؛
- تنتقل بنية الغاز جزئياً إلى أدوار الاحتياط والكيميائيات والمنتجات الاصطناعية؛
- تستثمر شركات النفط والغاز في الطاقة الشمسية الفضائية وهوائيات الاستقبال وكيمياء الهيدروكربونات والمواد الكربونية؛
- يمكن لصناعة الفحم الانتقال إلى المركبات الكربونية والمواد المختزلة والمواد الأولية الكيميائية والمواد الصناعية؛
- تصبح بعض شركات الطاقة الراسخة مشغلة للتوليد المداري وهوائيات الاستقبال وتوزيع الشبكات.

النقطة السياسية والاقتصادية الأساسية ليست مطالبة الصناعات النافذة بأن تدمر نفسها فوراً، بل منحها طريقاً للانتقال. فإذا استطاع قطاع الطاقة الكربونية الحفاظ على هوامشه أو تحسينها عبر الطاقة الشمسية الفضائية والإنتاج الكيميائي، أمكن خفض مقاومة الانتقال بدرجة كبيرة.

8.3.4. كيف يختلف ذلك عن «الأجندة الخضراء» التقليدية

يقترح StarRoad توسيع الطاقة لا التقشف فيها. ولا يقوم منطقه المناخي على تقليص قدرة الحضارة، بل على نقل تلك القدرة إلى بنية تحتية أكثر استدامة.

ويختلف ذلك عن النهج الذي يُفهم على أنه يطالب الناس بأن «يعيشوا حياة أسوأ من أجل المناخ». تجمع الطاقة الشمسية الفضائية مع StarRoad لتدعم رؤية أخرى:

- طاقة أكثر، لا أقل؛
- انبعاثات أقل، لا صناعة أقل؛
- قدرة حوسبة متاحة أكبر، لا قيود على الاقتصاد الرقمي؛
- توسّع كهربة النقل والإنتاج والحياة اليومية؛
- فرص أكبر للمناطق النامية؛
- اعتماد أقل على الموارد الأحفورية كوقود، مع الإبقاء على الكربون مادة أولية صناعية.

يناسب هذا النهج منطق StarRoad الحضاري على نحو أفضل: فالمشروع لا يطلب من البشرية أن تنكمش، بل ينشئ بنية تسمح بالنمو من دون البصمة الكربونية السابقة.

8.3.5. الخلاصة: الطاقة الشمسية الفضائية بوصفها السوق الأولية

ليست محطات الطاقة الشمسية الفضائية من فئة الغيغاواط استخداماً ثانوياً لـStarRoad؛ بل هي أحد الأسباب المحورية لضرورته الاقتصادية.

وهما معاً:

- ينشئان طلباً واسعاً على عمليات الإطلاق فائقة الثقل؛
- يوفران إيرادات تجارية واضحة من بيع الطاقة؛
- يمدان القاعدة الصناعية المدارية المستقبلية بالطاقة؛
- ينشئان طلباً على هوائيات الاستقبال والمرحلات والقاطرات وأحواض بناء السفن والمستوطنات الخدمية؛
- يفتحان لصناعات الطاقة الكربونية مجالاً استثمارياً جديداً؛
- يوفران آلية حقيقية للعمل المناخي على نطاق الكوكب.

في ظل لوجستيات الصواريخ تظل محطات الطاقة الشمسية الفضائية أثقل وأغلى وأكثر تعقيداً تشغيلياً مما ينبغي. أما في ظل لوجستيات StarRoad فتصبح حمولة طبيعية تُنتج بالتسلسل: ليست مهمة استثنائية، بل منتج طاقة لصناعة بنية تحتية واسعة النطاق.

8.4. المواقع المدارية: GEO وEML4/5

المواقع الرئيسية لمحطات الطاقة الشمسية الفضائية هي المدار الثابت بالنسبة إلى الأرض ونقطتا لاغرانج EML4/5 في منظومة الأرض والقمر.

يناسب المدار الثابت إرسال الطاقة إلى مناطق أرضية ثابتة. يحافظ قمر أو منصة في GEO على موضع شبه ثابت بالنسبة إلى السطح، فيسهل توجيه حزمة الموجات الصغرية وتحديد موقع الريكتينا وربط الشبكات. ويبلغ ارتفاع المدار الثابت نحو 35,800 كم فوق خط الاستواء.

تناسب EML4 وEML5 المستوطنات وأحواض السفن والعقد الصناعية ومجموعات الطاقة الكبيرة. تقعان عند رأسي مثلثين متساويي الأضلاع في نظام الأرض والقمر وتتمتعان باستقرار طويل أفضل من L1/L2 الخطيّتين، فيمكن إقامة منشآت ضخمة دون استهلاك مستمر لكميات كبيرة من وقود حفظ الموقع.

يقلل استخدام GEO وEML4/5 التعارض مع المدار المنخفض أيضاً. فلا يلزم وضع صفائف هائلة في LEO تسبب تلوثاً ضوئياً وخطر تصادم وسحباً جوياً وتشويشاً فلكياً. ويبقى LEO منطقة خدمة لهبوط الكبسولات والعمليات الوسيطة والفحص والمهام المنخفضة الخاصة.

8.5. المرحلة الأولى: رحلات AstroLiner-S المباشرة

تستخدم المرحلة الأولى AstroLiner-S، النسخة الأولية المبسطة والأقل خطراً. لا تحمل مصدراً نووياً أو اندماجياً وتستخدم الدفع الكيميائي للإدخال النهائي والتصحيح والخروج والعودة.

الهدف إنشاء تدفق أولي دون انتظار اكتمال البنية المدارية، ولذلك يجب أن تنقل AstroLiner-S الوحدات الكبيرة مباشرة:

- إلى المدار الثابت لتركيب المحطات الشمسية ومرحلات الطاقة؛

- إلى مجموعات الطاقة عند EML4/5؛
- إلى المدارات عالية الطاقة لنشر المحطات الشمسية ومراكز البيانات.

تكون الحمولات أساساً هياكل كاملة أو شبه كاملة:

- محطات شمسية فضائية ذاتية الانتشار؛
- وحدات نقل الطاقة؛
- ألواح مشعات كبيرة؛
- كتل حوسبة لمراكز البيانات؛
- هياكل جمالونية؛
- روبوتات تجميع؛
- محطات خدمة أولية؛
- احتياطي وقود وموائع تشغيل؛
- وحدات اتصال وملاحة ومراقبة حركة.

مزايا EML4/5 وGEO على LEO:

- لا تلوث ضوئياً من أقمار المدار المنخفض.
- إضاءة شبه مستمرة للمحطات دون دورة ليل ونهار منتظمة.
- موضع ثابت بالنسبة إلى الأرض والقمر.

أرقام المرحلة الرئيسية:

- وتيرة الإطلاق: 1–2 شهرياً، أو 12–24 سنوياً.
- الحمولة في الرحلة: 10,000 طن.
- التدفق السنوي: 120,000–240,000 طن.
- كلفة الإيصال: $80–120/kg.
- المدارات المستهدفة: EML4/5 وGEO.

يتجنب هذا النهج فخ بناء البنية الفضائية كلها قبل تحقيق الإيراد؛ فالحمولات التجارية الأولى نفسها أجزاء من البنية المستقبلية.

8.6. مرحلة النضج: مرحلات الموجات الصغرية وبنية الخدمة

تبدأ حين تكفي المحطات ومراكز البيانات والمنصات لتشغيل شبكة مدارية دائمة. ويتسع العمل من إطلاق المنشآت الجديدة إلى خدمة المنشآت المنتشرة.

عناصرها الرئيسية:

- شبكة مرحلات موجات صغرية في GEO؛
- عقد خدمة دائمة قرب مجموعات الطاقة؛
- مركبات إصلاح وفحص؛
- محطات تخزين؛
- قاطرات مدارية؛
- أولى المستوطنات الدائمة والأطقم المتناوبة عند EML4/5؛
- أحواض سفن آلية وشبه آلية؛
- مركز نقل عند EML1.

تتيح المرحلات توزيع الطاقة بمرونة بين مناطق الأرض وتقليل الاعتماد على هندسة الاتصال المباشر بين المحطة والريكتينا، فتُبنى شبكة طاقة لا محطات منفصلة. وعلى الأرض تلزم ريكتينات استقبال ومحطات تحويل وتخزين وسيط وروابط بالشبكات الإقليمية.

تطيل الخدمة الدائمة عمر المحطات. من دونها يقيد اقتصادها عمر كل وحدة. وإذا أمكن تبديل الألواح والمرسلات والمشعات والإلكترونيات والجمالونات في المدار غدت منشآت طاقة قابلة للصيانة لا أقماراً للاستخدام الواحد.

8.7. تقسيم النقل حسب بيئة التشغيل

تقوم لوجستيات StarRoad الناضجة على فصل وظائف النقل حسب البيئة، لا على مركبة فضائية شاملة.

يتولى AstroLiner النقل بين الأرض والمدار والعودة. وهو رافع ثقيل مداري وطائرة شراعية عائدة وناقلة حاويات ثقيلة، لا مركبة شاملة بين الكواكب.

تعمل ناقلات ما بين المدارات في الفضاء فقط، فلا تحمل درع هبوط حرارياً ولا أجنحة ولا أنظمة بحرية ولا هيكلاً مقوى للهبوط المائي. يقل وزنها الجاف ويطول عمرها لأنها مخصصة للعقد المدارية.

تهبط كبسولات متخصصة إلى الكواكب وتعيد الناس أو البضائع إلى السطح. لا ينبغي دمجها في هيكل AstroLiner؛ فمن غير المعقول إنزال آلاف الأطنان لتسليم مجموعة صغيرة.

هرمية النقل:

الوظيفة	المركبة الرئيسية	البيئة
رفع البضائع والوحدات فائق الثقل	AstroLiner / AstroLiner-S	**الأرض ← المدار**
النقل بين LEO وGEO وEML1/2/4/5	ناقلات وقاطرات بين مدارية	**المدارات العالية ونقاط لاغرانج**
هبوط الناس والبضائع	كبسولات ركاب وبضائع	**المدار ← السطح**
تخزين وتجميع وإصلاح ونقل	محطات ومستودعات وأحواض سفن	**العقد المدارية**

يخفض التقسيم الوزن الجاف والتنازلات ويجعل اللوجستيات الفضائية أقرب إلى النقل البحري بناقلاته وقاطراته وموانئه ومستودعاته وأحواضه وسفنه المتخصصة.

8.8. دور AstroLiner في اللوجستيات الناضجة

ليس AstroLiner مركبة شاملة؛ دوره الأساسي رافع دوري فائق الثقل وناقل عودة قابل لإعادة الاستخدام.

يحمل صعوداً:

- حاويات بضائع؛
- وحدات ركاب؛
- وحدات وقود؛
- مكونات بناء؛
- ألواحاً وجمالونات وكابلات ومشعات؛
- قاطرات مجمعة أو مفككة؛
- كبسولات هبوط؛
- وحدات محطات مدارية؛
- مكونات محطات الطاقة ومراكز البيانات.

يعود غالباً فارغاً أو بحمولة محدودة:

- الطاقم؛
- العينات؛
- التجميعات الغالية القابلة للإصلاح؛
- الإلكترونيات المتقاعدة؛
- الأجزاء المعطلة أو المنزوعة.

يجب أن يكون تكوين العودة خفيفاً قدر الإمكان. فالانزلاق والدخول والهبوط المائي الآمن تتطلب أدنى كتلة متبقية، ولذلك تقل كتلة العودة كثيراً عن الإطلاق. إعادة آلاف الأطنان ليست عملاً روتينياً؛ تنفذه كبسولات أو وحدات عودة منفصلة.

يحتفظ AstroLiner بقدر محدود من دلتا-في لأربعة أسباب:

1. الاستقلال عن بنية لم تكتمل؛
2. استخدام طرق بديلة؛

3. الطوارئ؛
4. المرونة في التشغيل الأولي.

في النضج توفر القاطرات والناقلات معظم دلتا-في بين المدارات، فتخف متطلبات AstroLiner ويطول عمر هيكله وتقصر دورة الإطلاق والتفريغ والعودة والصيانة وإعادة الإطلاق.

8.9. ناقلات وقاطرات بين مدارية

هي أسطول StarRoad الفضائي الدائم، وتعمل بين LEO وGEO وEML1 وEML2 وEML4/5 وغيرها من دون دخول الغلاف الجوي أو العودة إلى الأرض.

مهامها:

- نقل الوحدات من نقطة تفريغ AstroLiner إلى المدار الهدف؛
- قطر محطات الطاقة ومراكز البيانات والجمالونات؛
- نقل الوقود وموائع التشغيل؛
- نقل وحدات الركاب؛
- خدمة مكونات المحطات واستبدالها؛
- إيصال الكبسولات إلى مدارات الهبوط؛
- إعادة القاطرات الفارغة إلى EML1 أو EML4/5؛
- دعم أحواض السفن المدارية.

يمكنها استعمال الدفع الكهربائي أو المغناطيسي البلازمي أو النووي الكهربائي أو الشمسي الكهربائي أو الهجين. ولأنها لا تدخل الغلاف الجوي يمكن تخصيصها بمشعات كبيرة وجمالونات خفيفة وخزانات ضخمة ووحدات دفع قابلة للاستبدال وصيانة مدارية.

في البنية الناضجة يحول النقل بين المدارات StarRoad من نظام إطلاق إلى شبكة نقل فضائية.

8.10. الهبوط إلى الأرض والكواكب الأخرى

تنفذ الكبسولات المتخصصة الهبوط فلا يلزم جعل AstroLiner مركبة إعادة دخول شاملة.

الأنواع الرئيسية:

كبسولة الركاب (PC) — للناس، مصممة للدخول الآمن والطوارئ والهبوط الذاتي والاتصال بوحدة الركاب.

كبسولة البضائع (CCap) — للبضائع الثمينة والعينات والمعدات والمواد الحيوية والإلكترونيات والأجزاء العائدة إلى السطح.

كبسولة العودة الصناعية (IRC) — كبسولة بضائع معززة لإعادة المواد بكميات كبيرة إذا نشأت سوق لذلك لاحقاً.

يحمل AstroLiner الكبسولات إلى المدار. وتنقلها القاطرات بين المدارية، أو AstroLiner نفسه في البداية، إلى مدار الهبوط التشغيلي. وبعد الانفصال تدخل كل كبسولة وتهبط مستقلة.

تستخدم القمر والمريخ والزهرة والكويكبات أنظمة هبوط منفصلة تلائم بيئاتها. فلا تستطيع مركبة شاملة خدمة كل جرم في النظام الشمسي لاختلاف الغلاف الجوي والجاذبية والتدفق الحراري والغبار ومتطلبات الإقلاع اختلافاً كبيراً.

8.11. الوحدات المعيارية

المعيارية أساس لوجستيات StarRoad. فكما غير النقل بالحاويات التجارة العالمية، ينبغي للوحدات المدارية المعيارية أن تغير اقتصاد الفضاء.

أنواع الوحدات الأساسية:

وحدة الركاب (PM) — وحدة مضغوطة تصلح داخل AstroLiner أو ناقلة بين مدارية أو محطة مدارية أو كبسولة ركاب. تضم دعم الحياة ومقاعد أو حجرات واحتياطياً للطوارئ وواجهات التحام ونقاط تثبيت معيارية.

حاوية البضائع (CC) — حاوية مضغوطة أو غير مضغوطة للألواح والجمالونات والمشعات والكابلات والمعدات والروبوتات وقطع الغيار والمواد الاستهلاكية.

وحدة الوقود (PrM) — تخزن الوقود وموائع التشغيل والماء والأكسجين والهيدروجين والأرغون والزينون وغيرها للقاطرات والمحطات.

وحدة المرافق (UM) — وحدة طاقة أو تبريد أو اتصال أو تحكم قد تضم ألواحاً شمسية وبطاريات ومشعات وهوائيات ومحولات ومبادلات حرارية وإلكترونيات تحكم.

وحدة البناء (CM) — تضم جمالونات وعوارض وأقسام إطارية وروبوتات تجميع وأنظمة تثبيت وحبالاً وكابلات وهياكل قابلة للنشر.

وحدة نقل الطاقة (PTM) — تضم هوائيات موجات صغرية ومصفوفات طورية وإلكترونيات قدرة وأنظمة توجيه الحزمة والتحكم بها.

ينبغي توحيد ما يأتي في كل وحدة:

- فئات الأبعاد؛
- الواجهات الإنشائية؛
- نقاط الإمساك الروبوتية؛
- واجهات الالتحام؛
- الواجهات الكهربائية والحرارية؛
- الهوية الرقمية وسجل الصيانة؛
- نطاقات الكتلة ومركز الثقل المسموح بها؛
- أوضاع التثبيت والفصل الطارئ.

وبذلك تُجمع المحطات والمركبات ومحطات الطاقة والمجمعات الصناعية من كتل معيارية، لا بوصفها مركبات فريدة.

8.12. هرمية البنية المدارية

تُنظم لوجستيات StarRoad المدارية في هرمية من العقد.

الأرض / StarRoad

. التصنيع والتجميع والإطلاق وإصلاح AstroLiner وإنتاج الوحدات وتحضير الوقود والطاقة والتحكم في تدفق البضائع.

LEO

. منطقة خدمة لكبسولات الهبوط والفحص والطوارئ والعمليات المؤقتة وفصل الكبسولات قبل الدخول. وفي النظام الناضج ليست المستودع الرئيسي ولا حزاماً صناعياً مكتظاً.

GEO

. منطقة مرحلات الموجات الصغرية ومنصات الطاقة والاتصالات ونقل الكهرباء إلى مناطق ثابتة من الأرض، ومناسبة لربط الطاقة المدارية بالشبكات الأرضية.

EML1

. مركز النقل الرئيسي في نظام الأرض والقمر. يمكن لـ AstroLiner الوصول إليه وتفريغ الوحدات حين لا تحتاج الحمولة إلى رحلة مباشرة إلى مقصدها النهائي. توجد فيه المستودعات والقاطرات ومراقبة الحركة والإصلاح ومحطة نقل المصعد القمري.

ينبغي أن يكون EML1 مؤتمتاً بدرجة عالية. لا حاجة إلى قوة عمل مقيمة كبيرة؛ يمكن للناس الإقامة في أنابيب الحمم القمرية الأكثر حماية أو عند EML4/5 أو في المحطات الكبيرة والذهاب إلى EML1 عند الحاجة.

EML2

. منطقة علمية ورصدية للمراصد الهادئة راديوياً وتلسكوبات الفضاء العميق ومحطات الاختبار والاتصالات والمنشآت العلمية على الجانب البعيد من القمر وقربه.

EML4 / EML5

. المركزان الرئيسيان لحضارة مدارية ناضجة: أحواض سفن ومستوطنات ومحطات صناعية ومحطات طاقة كبيرة وتجميع مركبات بين كوكبية ومستودعات وقواعد إصلاح ومراكز تحكم بالتوسع.

8.13. أحواض بناء السفن المدارية

تقام أساساً عند EML4/5 لتجميع هياكل لا يمكن أو لا ينبغي إطلاقها كاملة حتى بواسطة StarRoad.

ينقل AstroLiner المواد والهياكل كحمولات مسطحة:

- ألواحاً؛
- جمالونات؛
- مقاطع إنشائية؛
- كابلات؛

- مشعات؛
- مرايا؛
- أغشية؛
- خزانات؛
- تجميعات حاملة للأحمال؛
- أنظمة تجميع روبوتية.

تنفذ الروبوتات والمشغلات البعيدة التجميع. ويتولى البشر الخدمة والإشراف والإصلاحات المعقدة والقرارات الاستثنائية، ولا ينبغي أن يؤدوا يدوياً معظم أعمال التجميع الخطرة.

تبني الأحواض:

- محطات طاقة شمسية فضائية جديدة؛
- حقول مشعات كبيرة؛
- ناقلات بين مدارية؛
- مركبات بين كوكبية؛
- محطات سكنية؛
- مجمعات معالجة كويكبات؛
- مكونات هياكل عملاقة مستقبلية.

عند هذه المرحلة لا تعود StarRoad نظاماً للإطلاق من الأرض فحسب، بل تصبح الحلقة الدنيا في سلسلة إنتاج توفر فيها الأرض المكونات المعقدة بينما يتولى الفضاء تدريجياً التجميع والخدمة وجزءاً من التصنيع.

8.14. المستوطنات المدارية والقمرية

لا تنشأ المستوطنات الدائمة غايةً في ذاتها، بل من ضرورة خدمة البنية الكبيرة. فحين تتكاثر المحطات والأحواض والقاطرات والمرحلات وعقد الإنتاج القمري والمنصات الصناعية لا تكفي الخدمة عن بُعد وحدها.

الشكل الرئيسي للمستوطنة المدارية الكبيرة محطة دوارة ذات جاذبية اصطناعية، مثل طارة ستانفورد أو مشتقاتها. توضع أساساً في مواقع مستقرة طويلة الأمد ومنها EML4/5، وتكون مراكز سكن وخدمة وطب وإصلاح وإدارة للصناعة المدارية.

ينبغي أن يقيم الموظفون الدائمون للقواعد القمرية في محطات الجاذبية الاصطناعية عند EML4/5 لا على سطح القمر. فيحد ذلك آثار الجاذبية القمرية المنخفضة ويبقيهم قرب البنية القمرية. ويصبح سطح القمر موقع عمل صناعي بفرق متناوبة.

يصبح EML1 مركز النقل واللوجستيات للقمر، ويجمع المستودعات والأرصفة والقاطرات ووحدات التزود والإصلاح والتحكم في التدفقات بين الأرض والقمر وEML4/5. وإبقاء الموظفين قرب القمر يبسط المناوبات والطوارئ والإصلاح والتحكم في الإنتاج مقارنة بإرسالهم كل مرة من الأرض.

يشكل المصعد القمري بين السطح ومنطقة EML1 عنصراً رئيسياً. ينقل الثرى والأكسجين والمعادن ومواد البناء والوحدات إلى أعلى، والمعدات والمواد المستهلكة والأطقم المتناوبة إلى أسفل. وبذلك يصل الصناعة القمرية دائماً بأحواض السفن والمستوطنات واللوجستيات بين المدارية من دون إطلاق صواريخ متكرر من السطح.

بسبب الجاذبية المنخفضة تكون المستوطنات القمرية قواعد صناعية محمية بفرق متناوبة، تدعم التعدين والمعالجة والطاقة والبناء والمعدات الآلية وإنتاج الأكسجين ومعالجة الثرى وتجميع المصعد وتحضير شحنات EML1.

يتكون الحماية **الإشعاعية** من طبقات:

- دروع سلبية من الماء والبولي إيثيلين والثرى والوقود أو المخزون؛
- وضع أكثر المناطق حماية في القلب والداخل؛
- حماية مغناطيسية نشطة لخفض الجسيمات المشحونة؛
- ملاجئ طوارئ لأحداث البروتونات الشمسية.

الماء والهيدروجين والبولي إيثيلين والوقود والثرى مخزونات نافعة وكتلة حماية معاً. فلا يلزم أن تكون الحماية وزناً ميتاً حين تدخل دورة تشغيل المحطة أو القاعدة أو المصعد أو عقدة EML1.

8.15. المجاز اللوجستي: الفضاء شبكة بحرية

يشبه نظام StarRoad الناضج اللوجستيات البحرية أكثر من برنامج إطلاق.

في هذا المجاز:

- **AstroLiner** ناقلة حاويات فائقة الثقل بين الأرض والمدار؛
- **القاطرات بين المدارية** جرارات موانئ وقاطرات محيطية؛
- **الناقلات بين المدارية** سفن للمسارات الطويلة؛
- **EML1** ميناء عبور ومركز توزيع؛
- **GEO** مرسى للطاقة والاتصالات؛
- **EML4/5** موانئ صناعية وأحواض سفن ومدن؛
- **الكبسولات** مركبات هبوط متخصصة؛
- **وحدات PM وCC وPrM وUM** وCM وPTM حاويات وكتل وظيفية.

يغير هذا النهج ثقافة الرحلات الفضائية نفسها. فتحل الجداول ودوران الحاويات والإصلاح والتأمين والمعايير والمستودعات ومراقبة الموانئ وحركة الشحن الصناعية محل البعثات الفريدة.

8.16. اقتصاديات تدفق البضائع

تقلب StarRoad القاعدة المركزية لاقتصاد الفضاء. في اللوجستيات الصاروخية يكون توفير الكيلوغرام أرخص لأن كل كيلوغرام باهظ؛ وفي StarRoad يكون التوحيد والإنتاج الكمي والإطلاق بدفعات كبيرة أرخص.

يغير ذلك الخيارات الهندسية:

- يمكن جعل الهياكل أقوى وأسهل إصلاحاً؛
- يمكن منح المعدات هوامش أكبر؛
- يمكن تصميم المحطات منشآت قابلة للصيانة لا أقماراً للاستخدام الواحد؛
- لا تبقى كتلة المشعات والدروع والهياكل قيداً مطلقاً؛
- تصير المنصات الكبيرة أوفر من مركبات صغيرة كثيرة قصيرة العمر.

الأثر الاقتصادي الحاسم هو أن StarRoad تنشئ سوقاً للمنشآت المدارية، لا سوق إطلاق فحسب. ويمكن أن يأتي الدخل من النقل ومن المشاركة في تصنيع وامتلاك وتشغيل محطات الطاقة ومراكز البيانات والمرحلات والقاطرات وأحواض السفن وشبكات الطاقة.

تشمل النماذج التجارية الممكنة:

- بيع الإطلاقات للعملاء الخارجيين؛
- عقوداً طويلة لبنية الطاقة؛
- امتلاك وتشغيل محطات الطاقة الشمسية الفضائية؛
- مشروعات مشتركة مع شركات الطاقة؛
- تأجير سعة مراكز البيانات المدارية؛
- بيع الكهرباء عبر الريكتينات الأرضية؛
- عقود خدمة المنشآت المدارية؛
- تعرفات النقل بين المدارات؛
- التأمين والإصلاح وإطالة عمر المحطات.

يقلل هذا النهج الاعتماد على سوق واحدة. فإذا لم يكف الطلب الخارجي، تنشئ StarRoad تدفقها الخاص عبر برامج الطاقة والصناعة المدارية.

8.17. مراحل تطور السوق واللوجستيات

يتطور الطلب والخدمات اللوجستية المدارية عبر أربع مراحل.

I. مرحلة التأسيس (10–20 سنة) — تدفق شحنات الطاقة.
تطلق AstroLiner-S محطات شمسية فضائية كاملة أو شبه كاملة، ومراكز بيانات، ومرحلات، ووحدات خدمة، والقاطرات الأولى. والهدف الأساسي إثبات انتظام الإطلاق، وإنشاء أول مرافق طاقة تجارية، وتكوين سوق لتوليد الكهرباء مداريًا.

II. المرحلة الناضجة (20–50 سنة) — شبكة الخدمات المدارية.
تظهر مرحلات GEO، وعقدة EML1، ومحطات الخدمة، ومركبات الإصلاح، والقاطرات، وأولى المستوطنات الدائمة وأحواض البناء في EML4/5. وتنتقل AstroLiner تدريجيًا من الرحلات المباشرة إلى كل وجهة، إلى دور منظومة نقل ثقيل تفرغ حمولتها عند عقد الشبكة.

III. المرحلة الصناعية (50–100 سنة) — التصنيع خارج الأرض.
يبدأ البناء النشط للمركبات بين الكوكبية، ومجمعات معالجة الكويكبات، والموائل المدارية الكبيرة. وتستخدم المنظومة مواد من خارج الأرض بصورة متزايدة، فتقلل الاعتماد على شحن كميات ضخمة من المواد الخام من الأرض.

IV. المرحلة التطورية والمحتملة (أكثر من 100 سنة) — بنية النظام الشمسي.
تصبح EML4/5 نقاط انطلاق للتوسع في النظام الشمسي، وبناء المنشآت العملاقة والأسراب الشمسية وأسطوانات أونيل ومراصد الفضاء السحيق والبعثات بين النجمية.

هذا التسلسل مهم: لا تتطلب StarRoad حضارة فضائية مكتملة منذ البداية. فهي تبدأ بمصادر طلب واضحة — الطاقة والحوسبة — ثم تتوسع إلى اقتصاد فضائي متكامل.

8.18. آفاق التطور: خليفة StarRoad

لا يلزم أن تكون StarRoad الشكل النهائي للبنية النقلية الكوكبية، بل مرحلة انتقالية ضرورية بين عصر الصواريخ وهياكل الهندسة الفلكية العملاقة الناضجة.

من الأنظمة الافتراضية المعروفة—المصعد الفضائي وحلقة الإطلاق وStarTram والحلقة المدارية والبرج الفضائي—لا يمكن أن يتجاوز سعة StarRoad في النهاية إلا حلقة مدارية متقدمة. لكنها تحتاج صناعة مدارية قوية ومواد هائلة وأحواضاً وطاقة وتجميعاً روبوتياً وخبرة في تشغيل الهياكل العملاقة.

قد يكون الخليفة نظام حلقتين متصلتين:

- حلقة نقل تحيط بالأرض وتلامس السطح عند أدنى نقطة؛
- حلقة ميناء ثابت وأحواض فضائية عند ارتفاع GEO؛
- عدة دوارات كبلية متحركة داخل أعمدة محكمة في حلقة النقل؛
- ربط حلقة النقل بحلقة الميناء ذات المدار المتزامن عند أعلى نقطة في المسار.

مثل حلقة الإطلاق تضم حلقة النقل دوارات سريعة في قنوات محكمة، لكنها قد تكون أكثر أماناً. فدواراتها الكبلية لا تنعطف بحدة وتتعرض لأحمال شعاعية أقل، ويمكن تصميمها عند الانقطاع كي تبتعد عن الكوكب من دون تدمير الهيكل كله. وستكون الحلقة برجاً فضائياً حلقياً ديناميكياً من السطح إلى الميناء الثابت.

ليست هذه المنظومة بديلاً لأول StarRoad بل خليفة ممكناً. فمن دون StarRoad أو خط رئيسي مماثل لا يمكن رفع مواد الحلقة ومعداتها وأحواضها وقدرتها الطاقية بسعر كافٍ.

8.19. إمكانات هندسة الكواكب: النظام الشمسي منظومة موارد واحدة

قد تفتح StarRoad مستقبلاً إمكانات تبدو اليوم غير معقولة، ومنها الهندسة الفلكية واسعة النطاق واستصلاح الكواكب. وهي سيناريوهات حضارية متأخرة لا تبدأ إلا بعد وجود رفع رخيص من الأرض وطاقة شمسية فضائية وأحواض عند EML4/5 وتعدين كويكبات ونقل بين كوكبي وأسطول ناقلات وطاقة مستقلة للفضاء العميق.

الفكرة أن يعامل الزهرة والمريخ لا كبرنامجين منفصلين بل منظومة موارد واحدة. يفتقر المريخ إلى النيتروجين والهيدروجين والغلاف الكثيف والحماية المغناطيسية. وفي الزهرة مخزونات هائلة من CO_2 والنيتروجين وكتلة وجاذبية قريبتان من الأرض، لكنها حبيسة نحو 460°C و92 ضغطاً جوياً وغلاف CO_2 وسحب حمض الكبريتيك وغياب المجال ودوران رجعي شديد البطء.

8.19.1. المرحلة التمهيدية: بنية النظام الشمسي

قبل استصلاح الكواكب يجب وجود:

- StarRoad لرفع الكتلة من الأرض بتكلفة منخفضة؛
- محطات شمسية فضائية وأسراب شمسية للطاقة؛
- أحواض مدارية عند EML4/5؛
- تعدين متقدم للكويكبات من أجل المعادن والماء والمتطايرات؛

- عشرات أو مئات المستوطنات المتقدمة المكتفية وعقد الطاقة الداعمة؛
- أسطول ناقلات للهيدروجين والماء والنيتروجين وCO_2؛
- أنظمة نقل نووية كهربائية أو اندماجية للمسافات الطويلة.

لا يحسن بدء هذه البرامج قبل مرور 100 سنة أو أكثر على تشغيل StarRoad، وقد تتسارع إذا نمت البنية الفضائية أسياً.

8.19.2. الزهرة: مراحل الاستصلاح

قد يلائم الزهرة الاستيطان الكبير الطويل أكثر من المريخ: جاذبيته نحو 0.9g وكتلته قريبة من الأرض والطاقة الشمسية وافرة. المشكلة هي الحاجز الأولي الهائل.

1. **التبريد وترسيب CO_2**
. يوضع حاجب ضخم عند L1 بين الزهرة والشمس لخفض الطاقة الواردة. ومع التبريد العميق يسيل أو يتجمد قسم كبير من CO_2 ويستقر على السطح، فيهبط الضغط بشدة وتتحول البيئة الجهنمية إلى بيئة متاحة للهندسة والبناء.
2. **الحلقة شبه المتزامنة والميناء**
المداري. بعد التبريد تُبنى حلقة مدعومة ديناميكياً على ارتفاع نحو 33,400 كم، موضع المدار المتزامن المستقبلي ذي 24 ساعة. محيطها نحو 248,000 كم، وجاذبيتها المحلية 0.021g وسرعتها الدائرية الحرة 2.87 كم/ث. تدعمها دوارات نشطة ما دام دوران الزهرة بطيئاً، وتعمل ميناءً مدارياً وعقدة طاقة واستقبال ناقلات.
3. **معالجة الغلاف واستيراد الهيدروجين**
. يُرفع CO_2 المترسب إلى مجمعات المعالجة، ويأتي الهيدروجين من النظام الشمسي الخارجي والأجرام الجليدية والكويكبات. تفاعل ربط CO_2 الأساسي هو:

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

يستخدم الماء للمحيطات والأكسجين، والميثان للوقود والكيمياء، ويثبت الكربون في المواد والمخزون الطويل، وتحول مركبات الكبريت إلى معادن. ويمكن شحن النيتروجين وبعض CO_2 الزائد إلى المريخ.
4. **الزهرة الصالح**
للسكن. يكتمل الاستصلاح الأساسي بعد تكوين المحيطات وغلاف النيتروجين والأكسجين والمناخ المضبوط والحماية المغناطيسية والغلاف الحيوي الأولي. ويمكن السكن حتى عند دورة وسطية نحو 120 ساعة؛ تخفف المحيطات والسحب وغلاف 1.3–1.6 bar ونقل الحرارة والمرايا والحجب ليالي نحو 60 ساعة.
5. **تصحيح الدوران من المدار ويوم 24**
ساعة. ليس اليوم ذو 24 ساعة شرطاً للسكن بل تحسيناً هندسياً طويلاً. يتطلب الانتقال من الدوران الرجعي إلى المباشر زيادة زخم زاوي نحو 4.3×10^{33} kg·m²/s. وعند سرعة عادم 100 km/s يلزم نحو 1.1×10^{21} kg من المائع. بطاقة نفث مثالية 5×10^{30} J يستغرق 300 EW نحو 500–600 سنة؛ ومع الخسائر وطاقة 3×10^{31}–10^{31} J يصبح 1,000–3,000 سنة عند 300 EW وعدة آلاف عند 100–200 EW. تنقل حلقتا نقل متناظرتان على جانبي الكوكب والحلقة شبه المتزامنة الزخم إلى السطح وتضيفان ثباتاً. وبعد بلوغ 24 ساعة تصبح الحلقة رصيفاً زهرياً متزامناً كاملاً.

8.19.3. المريخ: مراحل الاستصلاح

يسهل إنشاء القواعد الأولى على المريخ لكن يصعب صنع بيئة كوكبية كاملة. فجاذبيته 0.38g وغلافه رقيق ونيتروجينه ومتطايراته قليلة وحمايته المغناطيسية ضعيفة، لذا يحتاج مواد من الزهرة والكويكبات والنظام الشمسي الخارجي.

1. **غلاف مغناطيسي**
اصطناعي. الحماية المغناطيسية أول شرط طويل الأمد: حلقات شبيهة بحلقتي الأرض المتزامنة والنقل ومنصات طاقة ومرايا وأنظمة مغناطيسية مدمجة. دونها يبقى الغلاف عرضة للرياح الشمسية والفقد. وتجمع حلقة المريخ المتزامنة النقل والمدار والطاقة والمغنطة، وتغذي ألواحها ومخازنها الدائرة والإلكترونيات والتحكم التي تحفظ المجال الاصطناعي.
2. **استيراد الغلاف**
والماء. يأتي النيتروجين وبعض CO_2 من الزهرة، والماء من الكويكبات والأجرام الجليدية والنظام الخارجي. تزود شبكة الموارد المشتركة المريخ بمتطايراته الناقصة وتوفر مناخاً معتدلاً مستقراً أسرع من صنع الغلاف من موارده وحدها.
3. **تكثيف الغلاف وتدفئة المناخ**
. بعد الحماية تتراكم CO_2 والنيتروجين وبخار الماء وعوامل دفيئة إضافية. يعوض الغلاف الأثخن بعض البرودة ويزيد نقل الحرارة والضغط ومساحة وجود الماء السائل.

4. **الماء والتربة**
والغلاف الحيوي. تُنشأ الخزانات ويُعالج الثرى وتقل سمية التربة وتبدأ النظم الميكروبية والنباتية: أغلفة محمية محلية، ثم أقاليم مناخية، ثم محاولة استقرار عالمي.
5. **بيئة قابلة**
للاستخدام على مستوى الكوكب. بالاستيراد الكافي قد يكتسب المريخ غلافاً كثيفاً مضبوطاً وحماية مغناطيسية ومياهاً ومناطق حيوية وصناعة كبيرة. وقد يبقى 0.38g أقل ملاءمة من الزهرة للسكن الأرضي الطويل، لكن انخفاض الجاذبية يفيد في الإقلاع والهبوط واللوجستيات والبنى العملاقة والتصنيع ويجعله مركزاً صناعياً وعلمياً بين النظام الداخلي وحزام الكويكبات.

8.19.4. ميزة السيناريو المشترك

سيناريو الزهرة–المريخ–النظام الخارجي أقوى من كل نهج منفرد. يعاني المريخ نقص النيتروجين والماء والطاقة والحماية؛ ويضطر الزهرة وحده إلى معالجة غلاف CO_2 هائل بلا مستهلك للفائض. في النموذج المشترك يدعم نيتروجين الزهرة وCO_2 المريخ، ويدعم هيدروجين النظام الخارجي وماؤه الزهرة، وتوفر الكويكبات المعادن وكتلة البناء.

ليست StarRoad أداة استصلاح مباشرة بل أول حلقة سببية: ترفع الكتلة رخيصاً، وتوفر المحطات الطاقة، وتمكّن EML4/5 الأحواض، ويقدم التعدين المواد، وتتبادل الناقلات المادة بين الكواكب، وعندها فقط تصير هندسة الكواكب ممكنة.

8.20. الخلاصة الاستراتيجية

تنشئ StarRoad وAstroLiner اقتصاداً فضائياً دائماً، لا برنامج إطلاق.

الأسواق الأولى هي الطاقة الشمسية ومراكز البيانات وبنية الطاقة. والأسواق الناضجة هي الخدمة والإصلاح وترحيل الطاقة واللوجستيات والأحواض والمستوطنات. وتنشئ المرحلة الصناعية اقتصاد الكويكبات والكواكب، وتفتح مرحلة التطور طريق الهياكل العملاقة والبعثات البعيدة وتوسع الحضارة.

الفكرة المركزية أن StarRoad لا تبحث عن سوق داخل نموذج الرحلات القديم؛ بل تنشئ سوقاً جديدة تتحد فيها البضائع الكثيفة والطاقة المدارية والحوسبة والصناعة الفضائية في نظام لوجستي واحد.

9. النموذج الاقتصادي للمشروع

9.1. المنهج والافتراضات الرئيسية

يقوم النموذج الاقتصادي على المبادئ الآتية:

- **الإنتاج المتسلسل والتصنيع الداخلي:** تخفض وفورات الحجم كلفة آلات حفر الأنفاق والمولدات وأنظمة التخزين بنسبة 30–50٪.
- **التوطين:** استخدام الموارد والعمالة والمواد الأفريقية، مع معايرة التقديرات بدليل Spon's African Construction Cost Handbook.
- **أسعار السوق الحالية:** بيانات 2025–2026 لأنظمة BESS ومحطات الطاقة الجوفية.
- **سعر صرف إرشادي:** 1 EUR ≈ 0.90 USD ≈ 100 RUB. جميع الحسابات بدولارات 2025 الثابتة ومن دون تضخم. هامش عدم يقين ±30٪ معتاد في دراسة ما قبل الجدوى.

9.2. كلفة الحفر في الظروف الأفريقية

يعرض دليل Spon's African Construction Cost Handbook بالتفصيل تكاليف العمالة والمواد في 13 دولة أفريقية. ولا يقدم سعراً وحدياً مباشراً للأنفاق ذات المقاطع الضخمة بسبب شدة اختلاف الظروف، لكنه يتيح معايرة التقديرات.

أساس التقدير	الكلفة الإجمالية (مليار USD)	متوسط الكلفة لكل كيلومتر	الحجم	نوع الأعمال
استقراء لبيانات المقاطع الكبيرة عالمياً بعد تكييفها مع الظروف الأفريقية.	36.9–24.6$	12–18 مليون دولار أمريكي	2,050 كم	**النفق الرئيسي (17.5 × 12.5 م)**
استناداً إلى أعمال تعدين فعلية في أفريقيا: 3,500 دولار أمريكي/م للمقاطع الصغيرة.	61.5–36.9$	3–5 ملايين دولار أمريكي	12,300 كم	**أنفاق التجميع (6 × 2,050 كم، ø2 م)**
مثل أنفاق التجميع مع تصحيح للمقطع الأكبر.	12.3–8.2$	4–6 ملايين دولار أمريكي	2,050 كم	**نفق الخدمة (ø3 م)**

أساس التقدير	الكلفة الإجمالية (مليار USD)	متوسط الكلفة لكل كيلومتر	الحجم	نوع الأعمال
مثل النفق الرئيسي مع زيادة بسبب ميل 30°.	14.1–7.7$	12–22 مليون دولار أمريكي	640 كم	**الأنفاق المائلة (40 × 16 كم، 17.5 × 12.5 م)**
	124.8–77.4$		17,040 كم	**إجمالي طول الحفر**

9.3. أسطول آلات حفر أنفاق مصنّع داخلياً

يخفض طلب متسلسل يشمل 40 آلة رئيسية و240 آلة تجميع و40 آلة خدمة، مع خطي تجميع في الغابون وجمهورية الكونغو الديمقراطية، الكلفة بنسبة 30–50٪.

الإجمالي (مليار USD)	سعر الوحدة مع الإنتاج المتسلسل والداخلي	العدد	القطر	نوع الدرع
2.4–1.4$	35–60 مليون دولار أمريكي	40 وحدة	نحو 18 م	**آلة الحفر الرئيسية (SR-Main)**
0.36–0.19$	0.8–1.5 مليون دولار أمريكي	240 وحدة	2 م	**آلة حفر أنفاق التجميع (SR-Collector)**
0.08–0.05$	1.2–2 مليون دولار أمريكي	40 وحدة	3 م	**آلة حفر نفق الخدمة (SR-Service)**
2–1$	1–2 مليار دولار أمريكي	—	—	**مصنعا التجميع**
4.84–2.64$				**إجمالي آلات الحفر**

9.4. نظام مستقل للطاقة الحرارية الجوفية

بلغت كلفة محطة مينينغاي الجوفية الفعلية في كينيا، بقدرة 35 MW، نحو 35–40 مليون دولار أمريكي، أي 1,000–1,250 دولاراً/kW، شاملة الحفر وآبار البخار. ومع بناء 40 محطة متسلسلة وتوطين الإنتاج يمكن تقدير الوحدة بنحو 800–1,200 دولار/kW.

- كلفة محطة واحدة بقدرة 2.5 GW: 2.0–3.0 مليارات دولار.
- كلفة 40 محطة: 80–120 مليار دولار.

يدعم التقدير الحد الأدنى لكلفة المحطات الجيوحرارية الروسية، نحو 650 دولاراً لكل kW وفق بيانات إيتوروب، والحد الأعلى للمشروعات المعقدة، 1,500 دولار لكل kW.
يعتمد الحساب حداً أعلى قدره 100 GW للقدرة الإجمالية للمنظومة. ولا يمكن تقدير القدرة الفعلية إلا بعد المسح الجيولوجي، وقد تكون أقل بكثير، وصولاً إلى بضعة غيغاواطات. عندئذ توجه الأموال المتاحة إلى بناء مصادر توليد بديلة.

9.5. نظام تخزين الطاقة

يتألف التخزين من ثلاثة مستويات:

9.5.1. المستوى الأولي: تخزين طويل المدة في المحطات الطرفية

يوزع على 40 محطة طرفية ويخزن بهامش احتياطي 360 GWh اللازمة لعملية إطلاق واحدة. والتقنيات المفضلة بالأسعار الحالية هي:

المصدر	كلفة الوحدة	تقنية التخزين
خبرة Energy Vault: قدرة 25 MW وسعة 100 MWh مقابل 7.7 ملايين دولار، أي 77 دولاراً/kWh. كفاءة 75–85٪ وعمر 30–40 سنة.	50–100 دولار أمريكي/kWh	**تخزين طاقة الجاذبية**
استغلال فرق الارتفاع الطبيعي على امتداد المسار.	80–150 دولاراً أمريكياً/kWh	**التخزين الكهرومائي بالضخ والطاقة الكهرومائية الصغيرة على القناة الرئيسية الحرارية المائية**

المصدر	كلفة الوحدة	تقنية التخزين
بحسب Ember (2025): معدات صينية بسعر 75 دولاراً/kWh، إضافة إلى 50 دولاراً/kWh للتركيب. وعند سعة 215 GWh قد تنخفض الكلفة إلى 100 دولار/kWh.	125 دولاراً أمريكياً/kWh مركباً بالكامل	**نظام BESS ببطاريات الليثيوم-أيون**

تبلغ السعة الأولية الكلية 360 GWh، أي دورة تسريع كاملة. وفي مزيج من 70٪ تخزين بالجاذبية/الضخ و30٪ BESS تكون الكلفة:

الكلفة	كلفة الوحدة	السعة	المكوّن
15 مليار دولار أمريكي	60 دولاراً أمريكياً/kWh	GWh 250	**الجاذبية + التخزين بالضخ**
13.75 مليار دولار أمريكي	125 دولاراً أمريكياً/kWh	GWh 110	**BESS**
28.75 مليار دولار أمريكي		GWh 360	**إجمالي المستوى الأولي**

النطاق مع عدم اليقين: 22–35 مليار دولار أمريكي.

9.5.2. المستوى الثانوي: مخزن موازن قرب الملفات وفي النفق

تسوي دواليب الموازنة القريبة من الملفات حالات الانتقال. كلفة الوحدة 0.5–1 مليون دولار أمريكي/MWh؛ وسعة موازنة 1–5 GWh تكلف 0.5–5 مليارات دولار.

9.5.3. مستوى النبضات: استقرار في نطاق الميكروثانية

تعوض المكثفات الفائقة نبضات لا تتجاوز بضع ميكروثوانٍ وتثبت الجهد عند تغير الحمل فجأة. السعة الكلية أقل من 1٪ من طاقة الإطلاق، أي 1–3 GWh. وبسعر 300–500 دولار/kWh تبلغ الكلفة 0.3–1.5 مليار دولار.

9.5.4. الكلفة الإجمالية للتخزين

الكلفة (مليار USD)	السعة	التقنية	المستوى
22–35$	GWh 360	الجاذبية + الضخ + BESS	**أولي**
0.5–5$	1–5 GWh	الحذافات	**موازن**
0.3–1.5$	1–3 GWh	مكثفات فائقة	**نبضي**
22.8–41.5$			**إجمالي التخزين**

9.6. المراكز الصناعية والخدمات اللوجستية

أساس التقدير	الكلفة (مليار USD)	بند الكلفة
أحواض بناء السفن والمصانع والرافعات	3–6$	**المركز الصناعي في الغابون: تصنيع المركبات المكوكية ووحدات الإطلاق**
المركز الصناعي الجبلي ونظام التحليل الكهربائي	2–4$	**المركز الصناعي في جمهورية الكونغو الديمقراطية: بوابة عبور الغلاف الجوي على ارتفاع عالٍ ووحدات السرعة العالية**
أرصفة ورافعات ومستودعات	1–3$	**تطوير الموانئ في الغابون وعلى بحيرة تنجانيقا**
خطوط 220 kV وطرق وجسور	4–8$	**خطوط الكهرباء والطرق على امتداد 2,050 كم**
أعمال ترابية وتبطين وأهوسة	2–5$	**القناة الرئيسية الحرارية المائية**
	12–26$	**الإجمالي**

9.7. البحث والتطوير والنماذج الأولية — المرحلة 0

أساس التقدير	النطاق (مليار USD)	بند الكلفة
مرجع: تطوير توائم رقمية للهايبرلوب بقيمة 4.5 ملايين CHF.	0.01–0.03$	**النمذجة الرياضية وCFD**

بند الكلفة	النطاق (مليار USD)	أساس التقدير
المسح الجيولوجي لمسار 2,050 كم	0.025–0.015$	12,000–7,000 دولار أمريكي/كم للمسح التفصيلي للمناطق صعبة الوصول.
التصميم والتوثيق بنظام BIM	0.05–0.02$	المواصفات والتصاميم الأولية والتنفيذية.
منشأة اختبار البوابة والموصلات الفائقة	0.03–0.01$	منصة لاختبار حجرة بوابة نموذجية ووحدات الرفع المغناطيسي.
تأسيس الائتلاف والاتفاقات القانونية	0.015–0.005$	مفاوضات دولية وتسجيل وتأمين.
إجمالي المرحلة 0	0.15–0.06$	

ميزانية البحث والتطوير البالغة 0.06–0.15 مليار دولار ليست ثابتة. وقد ترفعها الدراسات المتعمقة أو نموذج بوابة كامل الحجم أو منصات اختبار كبيرة إلى 0.5–3 مليارات. لذلك يعتمد ملخص CAPEX نطاق 0.1–3 مليارات ومتوسطاً وسيطاً قدره 1.5 مليار دولار.

9.8. الملخص النهائي للإنفاق الرأسمالي

بند الكلفة	النطاق (مليار USD)	القيمة الوسيطة (مليار USD)	حصة CAPEX (٪)
حفر الأنفاق	124.8–77.4$	101.1$	%41
أسطول آلات الحفر وتصنيعها	4.84–2.64$	3.74$	%1.5
النظام الجوفي المستقل: 40 محطة بقدرة 2.5 GW لكل منها	120–80$	100$	%40
تخزين بثلاثة مستويات	41.5–22.8$	32.2$	%13
المراكز الصناعية واللوجستيات	26–12$	19$	%8
البحث والتطوير والتراخيص والإدارة	3–0,1$	1.5$	%0.6
احتياطي الطوارئ (15٪)	49–31$	40$	%16
إجمالي CAPEX	365–225$	295$	%100

الخلاصة الرئيسية: القيمة الوسيطة المقدرة لكلفة StarRoad تقارب 300 مليار دولار أمريكي.

9.9. التوزيع حسب المراحل (مليار USD)

بند الكلفة	المرحلة 0	المرحلة 1	المرحلة 2	المرحلة 3	المرحلة 4	المرحلة 5
حفر الأنفاق	—	—	5$	20$	70$	6$
آلات حفر الأنفاق	—	2$	0.7$	0.8$	0.2$	0.1$
منظومة الطاقة الحرارية الجوفية المستقلة	—	60$	20$	20$	—	—
التخزين	—	10$	10$	8$	3$	1$
المراكز الصناعية + اللوجستيات	—	5$	3$	3$	5$	3$
البحث والتطوير والتراخيص	1.5$	0.2$	0.1$	0.1$	0.05$	0.05$
الاحتياطي (15٪)	0.23$	11.6$	5.8$	7.8$	11.7$	1.5$
إجمالي المرحلة	1.73$	88.8$	44.6$	59.7$	90$	11.7$
الإجمالي التراكمي	1.73$	90.5$	135.1$	194.8$	284.8$	296.5$

9.10. استرداد الاستثمار وتطور كلفة النقل

جميع بيانات هذا القسم الفرعي نظرية محضة.

9.10.1. تطور وتيرة الإطلاق والكلفة لكل كيلوغرام

لا تبلغ StarRoad طاقتها القصوى فوراً. تتغير وتيرة الإطلاق وكلفة النقل مع تشغيل خطوط جديدة وزيادة أسطول المركبات ونشر البنية المدارية.
نموذج كلفة النقل إلى المدار الثابت وما بعده، بالدولار الأمريكي/kg:

الفترة	الخطوط	عمليات الإطلاق سنوياً	الوتيرة	كلفة النقل ($/kg)	ملاحظة
السنتان 1–2، التشغيل التجريبي	1	12–24	1–2 شهرياً	$80–120	أولى العمليات التجارية. ضبط التشغيل، ونفقات عامة مرتفعة، وسلسلة إنتاج صغيرة.
السنوات 3–5	1	50–100	1–2 أسبوعياً	$30–50	بدء التشغيل المتسلسل. ينمو الأسطول إلى 3–5 مركبات وتخفض وفورات الحجم الكلفة.
السنوات 6–10	1	200–300	نحو عملية يومياً	$10–20	يبلغ الخط الأول طاقته التصميمية وتصبح الصيانة مؤتمتة بالكامل.
السنوات 11–15	2	500–700	نحو عمليتين يومياً	$3–8	يدخل الخط الثاني الخدمة، فتوزع التكاليف الثابتة على مسرّعين.
السنوات 16–25	3–4	1000+	3–5 يومياً	$0.8–3	التوسع إلى 3–4 خطوط متوازية. توفر محطات شمسية فضائية بقدرة تتجاوز 1 GW الطاقة المدارية للمناورات ومعالجة الحمولة.
من السنة 26 فصاعداً	5+	1500+	5–10 يومياً	$0.3–1	بنية ناضجة. تغذي محطات الفضاء المسرّع والمصانع المدارية، وتصبح الكلفة الحدية للطاقة شبه معدومة.

9.10.2. حساب كلفة عملية إطلاق واحدة ($/kg)

معادلة كل فترة: Ckg = (Cالطاقة + Cالصيانة + Cالاستهلاك + Cالتشغيل) / Mالحمولة، حيث:

- Cالطاقة هي كلفة الكهرباء شاملة التبريد والأنظمة المساعدة.
- Cالصيانة هي صيانة المركبات والبنية التحتية.
- Cالاستهلاك هو إهلاك 300 مليار دولار من CAPEX على 50 سنة.
- Cالتشغيل يشمل الموظفين واللوجستيات والتأمين وغيرها من نفقات التشغيل.
- Mالحمولة هي كتلة الحمولة في العملية الواحدة: 10,000 طن.

القيم النهائية حسب الفترة:

الفترة	عمليات/سنة	الطاقة ($/kg)	الصيانة ($/kg)	الإهلاك ($/kg)	التشغيل ($/kg)	الكلفة الكلية ($/kg)
السنتان 1–2	12	1.8	6.63	50	3.57	62
السنوات 3–5	50	1	1.25	12	0.67	14.92
السنوات 6–10	250	0.36	0.23	2.4	0.13	3.12
السنوات 11–15، خطان	600	0.12	0.113	1	0.061	1.29
السنوات 16–25، 3–4 خطوط	1200	0.045	0.049	0.5	0.026	0.62
السنة 26+، خمسة خطوط فأكثر وطاقة شمسية فضائية	2000	0.015	0.015	0.3	0.008	0.34

9.10.3. هيكل كلفة الإطلاق بالقيم المطلقة

لسنة وسطية من كل فترة، بحمولة 10,000 طن:

الفترة	عدد العمليات	الطاقة لكل عملية (مليون USD)	الصيانة (مليون USD)	الإهلاك (مليون USD)	نفقات التشغيل (مليون USD)	الإجمالي لكل عملية (مليون USD)
السنتان 1–2	12	18	66.3	500	35.7	620
السنوات 3–5	50	10	12.5	120	6.7	149.2
السنوات 6–10	250	3.6	2.34	24	1.26	31.2
السنوات 11–15	600	1.2	1.13	10	0.61	12.93
السنوات 16–25	1200	0.45	0.49	5	0.26	6.2
السنة 26+	>2000	0.15	0.146	3	0.079	3.38

9.10.4. افتراضات الحساب الرئيسية

1. **الطاقة:** السعر الأساسي 0.05 دولار/kWh في السنوات الأولى؛ وينخفض بعد السنة 26 إلى 0.005 دولار/kWh بفضل المحطات الشمسية الفضائية والقدرة الجوفية الذاتية.
2. **الصيانة: مرتفعة** تجريبياً بسبب الإصلاح والضبط وفائض العاملين؛ وبحلول السنة العاشرة تصبح صيانة خطية مؤتمتة.
3. **الإهلاك:** توزيع CAPEX البالغ 300 مليار دولار على 50 سنة يساوي 6 مليارات سنوياً. ومع 250 عملية في السنة يساوي 24 مليوناً للعملية. وهو تقدير متحفظ لا يخصم الإيرادات الأخرى. ويمكن بدلاً من ذلك اعتبار الستة مليارات المستردة سنوياً تدفقاً استثمارياً متنامياً لفروع StarRoad الجديدة.
4. **المحطات الشمسية الفضائية:** ابتداء من السنة 16 تغذي المصانع المدارية وجزءاً من المسرّع، وتخفض كلفة الطاقة وتضاعف عائد بيعها مراتب عدة.

9.10.5. الديناميكية المجمعة: الإيراد مقابل الكلفة

الفترة	عمليات/سنة	متوسط سعر السوق ($/kg)	إيراد الإطلاق (مليار USD/سنة)	الكلفة (مليار USD/سنة)	الربح الإجمالي (مليار USD/سنة)
السنتان 1–2	12	100$	12	7.44	4.56
السنوات 3–5	50	39$	19.5	7.45	12.04
السنوات 6–10	250	9.6$	24	7.8	16.2
السنوات 11–15	600	3.9$	23.4	7.76	15.64
السنوات 16–25	1200	1.6$	19.2	7.44	11.76
السنة 26+	2000	0.5$	10	6.75	3.25

ملاحظة: لا يتضمن الجدول 35–44 مليار دولار سنوياً من بيع الطاقة الجوفية. فهذا تدفق مستقل يغطي إهلاك البنية التحتية ونفقاتها التشغيلية.

9.10.6. خلاصة تطور الكلفة

تبدأ StarRoad عند 80–120 دولاراً/kg إلى المدار الثابت وما بعده، أي أرخص بالفعل 10–15 مرة من Falcon Heavy إلى المدار المنخفض بسعر 1,400 دولار/kg، ومقارنة بهدف Starship البالغ 200 دولار/kg. تنخفض إلى 10 دولارات/kg في السنة العاشرة، ودولار واحد في الخامسة والعشرين، وأقل من 0.5 دولار/kg قرابة السنة الثلاثين مع خمسة خطوط فأكثر والطاقة الشمسية الفضائية. وهكذا تصبح الطاقة الشمسية ومعادن الكويكبات متاحة اقتصادياً للصناعة الأرضية.

الخلاصة الرئيسية: StarRoad منافسة حتى في التشغيل التجريبي. يخفض التوسع والتكامل مع الطاقة الشمسية الفضائية السعر مرتبتين خلال 30 سنة.

9.11. المقارنة بالبدائل

المشروع	النوع	الاستثمار (CAPEX / البحث والتطوير)	الاسترداد	الكلفة / LCOE	ملاحظة
مكوّن StarRoad للطاقة: النظام الجوفي + التخزين	الطاقة	100–150 مليار دولار أمريكي	5–7 سنوات من بيع الطاقة	0.05 دولار/kWh	توليد جوفي وتخزين فقط. يسترد استثماره كمشروع طاقة مستقل.
مكوّن StarRoad للنقل: النفق والبوابة والمركبات	النقل	150–200 مليار دولار أمريكي	8–12 سنة شاملة إيراد الشحن	1–10 دولارات/kg	المسرّع والبوابة والمركبات. يسترد الاستثمار من الشحن ويستخدم طاقة المكوّن الأول.
نظام StarRoad الكامل	الطاقة + النقل	نحو 300 مليار دولار أمريكي	8–12 سنة من الإيراد المجمع	0.05 دولار/kWh و1–10 دولارات/kg	مشروع متكامل بإيرادات من الطاقة والشحن.
Falcon Heavy، التطوير	النقل	نحو 5 مليارات دولار للبحث والتطوير	نحو 10–15 سنة بوتيرة تجارية	نحو 1,400 دولار/kg	صاروخ قائم. CAPEX هنا كلفة تطوير لا بنية تحتية.
Starship، التطوير	النقل	نحو 10 مليارات دولار للبحث والتطوير	نحو 10–15 سنة إذا تحقق السوق المستهدف	الهدف 200 دولار/kg؛ والمحتمل 50–100 دولار/kg	قيد التطوير. الاستثمار في البحث والتطوير لا في بنية دائمة.
سد إنغا الكبير الكهرومائي، جمهورية الكونغو الديمقراطية	الطاقة	80–100 مليار دولار	15–25 سنة	0.03–0.05 دولار/kWh	محطة كهرومائية ضخمة؛ طاقة فقط.
محطة نووية كبيرة، وحدتان بنحو 2.4 GW	الطاقة	15–20 مليار دولار	20–30 سنة	0.05–0.08 دولار/kWh	محطة نووية نموذجية؛ طاقة فقط.

9.12. الخلاصة الاقتصادية

يبين النموذج أن StarRoad قابلة للتنفيذ بوسيط CAPEX يقارب 300 مليار دولار. وأهم العوامل:

1. **النظام الجوفي، بكلفة 80–120 مليار دولار، هو الأغلى لكنه يسترد استثماره كمشروع طاقة مستقل خلال 5–7 سنوات.**

2. **حفر الأنفاق، بكلفة** 77–125 مليار دولار، ممكن تقنياً بآلات متسلسلة الصنع وتصنيع داخلي.
3. **التخزين، بكلفة 23–42** مليار دولار، يعتمد على انخفاض BESS إلى 125 دولاراً/kWh وعلى أنظمة الجاذبية وفق أفضل الممارسات العالمية.
4. **البحث والتطوير، بكلفة** 0.1–3 مليارات دولار، يعكس كلفة النماذج الأولية الحقيقية لا البناء الكامل.

الجاذبية الاقتصادية: بسعر 0.05 دولار/kWh تولد StarRoad من بيع الطاقة وحده 35–44 مليار دولار سنوياً. يغطي ذلك نفقات التشغيل ويتيح استرداد رأس المال من صادرات الطاقة قبل بدء عمليات الإطلاق الفضائي الواسعة.

10. السلامة وأوضاع التشغيل الطارئة

صُممت StarRoad وفق مبدأ بالغ **الصرامة لاستمرار التشغيل عند الأعطال**، بحيث لا يؤدي تعطل أي مكوّن منفرد — وكثيرًا ما عدة مكونات — إلى كارثة. وتتحقق السلامة بالتكرار **المادي وفصل الوظائف والبروتوكولات متعددة الطبقات التي تغطي** الدورة كلها من التحضير حتى الطيران.

10.1. فلسفة السلامة: لا يجوز أن يكون أي عطل منفرد كارثياً

- **التكرار الاحتياطي في الأنظمة الحرجة.** تُجهّز العناصر الأساسية — ومنها مفاعلات المكوك الموجودة على متنه، ومصادر طاقة مقاطع المسرّع، وحلقات النفث في بوابة العبور — بثلاث أو أربع وحدات مستقلة احتياطية.
- **التقسيم والعزل. يُقسَّم** النفق إلى مقاطع مستقلة طول الواحد منها 50–200 كم، لكل منها طاقته ونظام تفريغه، **وتفصل بينها بوابات ميكانيكية** للطوارئ. إذا فُقد الفراغ في مقطع مجاور فلا تُغلق بوابته **إلا عند خلوّه من المكوك، منعاً** لامتداد العطل على نحو متسلسل.
- **التحكم النشط والسلبي في التعليق** المغناطيسي. يوجد النظام الرئيس للتثبيت وتعويض الاختلال **على متن** المكوك. تعيد حلقات فائقة التوصيل ضخمة ووحدات الطاقة الداخلية توزيع الطاقة خلال أجزاء من المليون من الثانية لمقاومة الأعطال الموضعية في المنظومات الأرضية. وفي المنعطفات فرط الصوتية يزيد المقطع البيضوي للمكوك وقوة الطرد المركزي ثباته إزاء سطح التوجيه.
- **المكوك والطاقم أولاً. إذا وقعت حالة** طارئة أثناء الإطلاق، تعطي البروتوكولات الأولوية لإنقاذ المكوك حتى لو أدى ذلك إلى أضرار موضعية في بنية النفق.

10.2. المخاطر الرئيسة ووسائل الحماية منها

وسائل الحماية والبروتوكول	السبب	الخطر
1. **تثبيت على متن المكوك** بزمن استجابة من رتبة النانوثانية. **2. كبح حثي: عند** السرعة فرط الصوتية يستحث المكوك تياراً في الملفات السلبية للنفق، فينشأ أثر مُثبِّت **. 3. يحصر** التقسيم الاصطدام والضرر في مقطع واحد.	تعطل مقطع طاقة أو تلف ملف كهرومغناطيسي.	**فقد التعليق أو اختلال المجال عند سرعة فرط صوتية**
1. **منظومة احتياطية من ثلاث** حلقات، حول كل حلقة حماية مقاومة **للانفجار. 2. اختبار قبل الإطلاق** بستين ثانية يُنشئ المخروط الغازي من دون فتح المصراع الرئيس؛ وتُعزل الحلقات المعيبة . **3. يلغي الإنذار** 1 الإطلاق عند اكتشاف أي خلل.	تعطل حلقة نفث واحدة أو أكثر.	**تعطل الحاجز الغازي الديناميكي لبوابة العبور**
1. **شبكة حساسات ضغط** على امتداد النفق كله. **2. بوابات طوارئ بين** المقاطع لاحتواء الخلل. **3. بروتوكول توقف طارئ آلي — الإنذار 1 أو الإنذار** 2 — إذا كُشف ارتفاع للضغط أمام المكوك.	ارتفاع الضغط نتيجة حادث أو تلف.	**فقد الفراغ داخل النفق**
الإنذار 3: يخفض الكبح الأقصى، حتى 8g، السرعة. وتكون الأولوية لوضع المكوك على مسار دون مداري حتى لو فُقدت **بوابة العبور. تُفصل الحمولة** لتخفيف المركبة تمهيداً لهبوط آمن لاحقاً في المحيط.	اكتشاف عطل حرج في الجزء الأخير، أي 60–100% من مسار التسارع.	**اكتشاف عطل بعد أن يصبح التوقف مستحيلاً**

10.3. تسلسل بروتوكولات الطوارئ

- **الإنذار 1، طارئ قبل الإطلاق.** يُفعَّل قبل **تحرك المكوك** إذا كشف النظام فقد الفراغ أو خللاً في المجال المغناطيسي أو تعطل أي حلقة من حلقات البوابة أو تشكلاً غير طبيعي للمخروط **الغازي.** الإجراء: إلغاء الإطلاق فوراً، وعزل مقاطع النفق المعيبة بالبوابات، ثم التشخيص والإصلاح.
- **الإنذار 2، طارئ في بداية المسار أو وسطه،** 0–60%. **يُفعَّل بعد** الانطلاق عند اكتشاف عطل في جزء لاحق **من** المسار. الإجراء: كبح طارئ وتوقف داخل النفق. إذا كان العطل في الأمام عاد المكوك إلى نقطة البداية بقوته الذاتية. وإلا عُزل بعد توقفه بالبوابات داخل مقطعه الحالي، ثم مُلئ المقطع بالهواء وأُجلي الطاقم والركاب عبر نفق **الخدمة والآبار المؤدية** إلى السطح.
- **الإنذار 3، طارئ في الجزء الأخير من المسار، 60–100%.** يُفعَّل عندما يستحيل التوقف داخل النفق ويُحتمل تعطل بوابة العبور أو المقطع النهائي. **الإجراءات:**

1) **أقصى كبح طارئ، حتى** 8g، لخفض السرعة.

2) **الحفاظ على سلامة هيكل المكوك أولاً؛ وتظل** بوابة العبور مفتوحة.

3) **الدخول في مسار دون مداري** طارئ وفصل الحمولة عند ذروته لتخفيف المركبة.

4) **الهبوط في منطقة** محددة من المحيط الهندي أو الهادئ باستخدام جميع الأنظمة الأساسية والاحتياطية. صُمم هيكل المكوك لتحمل الأحمال الزائدة والتدمير الجزئي لبوابة العبور.

10.4. التدابير الإنشائية لضمان البقاء

- **المكوك.** مفاعلان مستقلان على متنه في النسخة الأطول مستقبلاً؛ ومنظومة تعليق فائقة التوصيل موزعة؛ وهيكل مقوّى للأحمال القصوى والصدمة الحرارية.
- **بوابة عبور الغلاف** الجوي على ارتفاع عالٍ. ثلاثة محركات نفاثة حلقية مستقلة داخل أغلفة مقاومة للانفجار. يتحمل المصراع الميكانيكي موجة الصدمة الناتجة من اختلال جزئي للحاجز الغازي. وتخفف الفتحات القمعية في الجدران الداخلية للبوابة الضغط فوراً وتنفّس الغاز سلبياً إلى حجرات فراغ احتياطية. وهي تقلل دخول غاز الغلاف الجوي إلى النفق والبوابة، فتحصر الضرر حتى بعد تعطل منظومة البوابة بالكامل وتمنع نبضة الضغط التي يصنعها المكوك فرط الصوتي من تمزيق المنشأة.
- **النفق.** تقسيم إلى مقاطع، وبوابات طوارئ، وأنظمة طاقة مزدوجة، ونفق خدمة تقني للإخلاء والإصلاح في الحالات الطارئة.

10.5. الآثار الصوتية وآثار موجة الصدمة

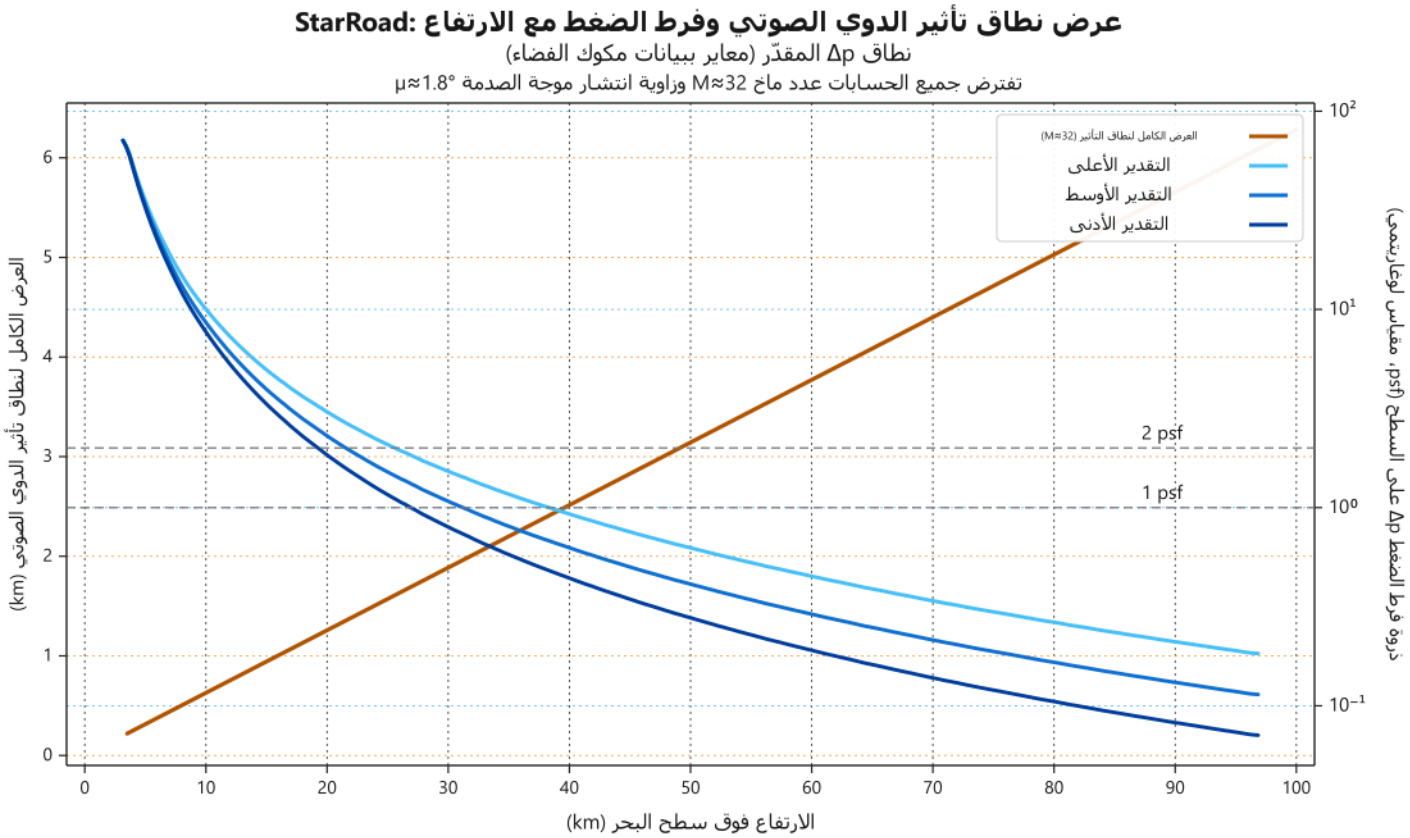
يُحدث خروج المكوك بسرعة فرط صوتية دويّاً صوتياً قوياً على هيئة موجة N. تنتقل معظم طاقة الموجة في حزام ضيق بمحاذاة المسار، فينخفض أثرها في البنية الأرضية القريبة من بوابة العبور. ومع ذلك تُقام حولها منطقة صحية مغلقة للحماية؛ تحدد النمذجة نصف قطرها وتؤكده اختبارات بالحجم الكامل.

يحدد حدّان لذروة الضغط الزائد Δp مقدار التعرض المقبول على السطح:

Δp ≤ 2 psf، أي نحو 96 Pa: يُعد تلف المباني والزجاج غير مرجح.

Δp ≤ 1 psf، أي نحو 48 Pa: الهدف في المناطق المأهولة، ويقابل حداً أدنى لاحتمال الشكاوى ومنع الضرر.

يُختار تصميم المسار وحدود التشغيل — ممر الحظر، ونوافذ الطقس، وقيود الارتفاع — بهامش كافٍ لضمان الالتزام بهذين الحدين.



الخلاصة: لا تقوم سلامة StarRoad على افتراض استحالة **الأعطال. بل تفترض إمكان كل نمط من أنماط الفشل وتحدد له استجابة آلية مسبقاً. وبذلك** تنتقل الفكرة من مسار افتراضي إلى **منظومة هندسية مدروسة وموثوقة، والأهم جديرة بالثقة.**

11. الأثر الثقافي والنفسي

إلى جانب أثرها التقني والاقتصادي ستؤثر StarRoad عميقاً في الثقافة والوعي الجمعي. يتحول كل إطلاق من عملية تقنية إلى **حدث عام هائل وشبه** مقدس.

11.1. المشهد بوصفه ظاهرة

ينشئ خروج المكوك الفرط صوتي ظاهرة فلكية بشرية فريدة: السهم الشمسي. يرى المراقب الآمن ومضة فورية عند الأفق ثم أثراً بلازمياً ساطعاً يصعد سريعاً في خط مستقيم. وبعد عشرات الثواني يصل دوي صوتي مزدوج مدمر بدلاً من هدير المحركات؛ إحساس مدينة طائرة بأكملها تعبر حاجزي الصوت والحرارة. وتضيء الإطلاقات الليلية المشهد كمذنب متحرك وشفق تقني غريب.

11.2. الصدى النفسي والرمزي

- **مقياس ملموس.** يصير البرنامج المجرد مشهداً يومياً أو أسبوعياً يُرى من مئات الكيلومترات، فيحول التوسع الفضائي من رسوم **إلى حقيقة** حياتية.
- **نموذج أصلي** جديد. يصبح السهم المضيء الهائل الذي تطلقه الأرض إلى الفضاء رمزاً للتقدم والإرادة والطموح، ويحل في الثقافة محل الصاروخ الرأسي القديم رمزاً لعصر **ممرات النقل** الفضائي.
- **الوحدة والفخر.** كما جمعت إطلاقات Soyuz وApollo العالم أمام الشاشات، تصبح رحلات StarRoad المنتظمة أحداثاً عالمية تثبت قدرة البشر على التعاون في أهداف هائلة.

11.3. النتائج الاجتماعية والاقتصادية

- **السياحة. تصبح** مجمعات المشاهدة عند الحدود الآمنة لمناطق الحظر مراكز لسياحة فضائية جديدة، وقد تضاهي مشاهدة الإطلاق زيارة عجائب العالم القديم.
- **الدافع التعليمي. يكون** المشهد أداة لا تضاهى لإلهام المسار المهني، فيدفع ملايين الأطفال إلى الفيزياء والهندسة والملاحة الفضائية.
- **نزع الغموض عن** الفضاء. تزيل الطبيعة المنتظمة والمتوقعة والصناعية هالة الاستثنائية والخطر المميت، وتعرض الرحلات **كعملية لوجستية عادية وإن كانت** هائلة.

وهكذا تنشئ StarRoad البنية المادية للوصول إلى الفضاء **والسرد الثقافي والأساس العاطفي** لقبول دور البشرية الجديد: حضارة تبني مستقبلها خارج المهد. ويذكّر ظهور السهم الشمسي المنتظم بأن طريق النجوم ليس مفتوحاً فقط، بل مستخدم بالفعل.

12. الخلاصة

StarRoad أكثر من مشروع هندسي عملاق؛ إنها استراتيجية للانتقال إلى حضارة فضائية صناعية. وبالانتقال من نموذج «الصاروخ» إلى نموذج «الممر»، يقدم المشروع سبيلًا لتجاوز العائقين الرئيسيين: تكلفة نقل الحمولة وضعف القدرة الاستيعابية.

يصبح الممر فرط الصوتي عمودًا فقريًا يربط الطاقة والزراعة والصناعة والخدمات اللوجستية وتقنيات الفضاء. كما تحصل أفريقيا على فرصة لقفزة صناعية وتقنية، باستخدام جغرافيتها ومواردها لبناء طريق إلى الفضاء بدلًا من الاكتفاء بتصدير المواد الخام.

بدمج التقنيات المثبتة وتوسيعها، تضع StarRoad أساس اقتصاد تصبح فيه موارد النظام الشمسي متاحة لحل مشكلات الأرض، بينما تعمل البنية التحتية نفسها ضمانًا ومنصة انطلاق لمستقبل البشرية. وسيتطلب تحقيقها تعاونًا دوليًا غير مسبوق واستثمارًا طويل الأجل وعزيمة هندسية؛ أما العائد فهو مفتاح عصر فضائي حقيقي، وموارد شبه غير محدودة خارج الأرض، وطاقة وفيرة.